

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»

Пермский инновационный территориальный кластер  
волоконно-оптических технологий «ФОТОНИКА»

# **ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА**

---

## **APPLIED PHOTONICS**

Т. 11, № 4

Издательство  
Пермского национального исследовательского  
политехнического университета  
2024

Публикуются статьи, содержащие фундаментальные и прикладные результаты исследований в области лазерной оптики, в том числе связанные с исследованиями в области технологии и свойств оптических компонентов, источников, приемников и преобразователей оптического излучения, оптических коммуникаций, оптических датчиков и информационных систем, лазерных технологий обработки материалов, фотоники в биологии и медицине, радиофотоники.

Предназначено для научных сотрудников, специализирующихся в области фотоники и оптоэлектронного приборостроения, студентов старших курсов направлений «Фотоника и оптоэлектроника», «Приборостроение», «Лазерная техника», «Волоконная оптика».

**Главный редактор:** *С.Л. Семенов*, д-р физ.-мат. наук, руководитель НЦВО РАН (Москва, Россия)

**Заместитель главного редактора:** *В.П. Первадчук*, д-р техн. наук, профессор (Пермь, Россия)

**Ответственный за выпуск:** *В.В. Криштон*, д-р физ.мат. наук, профессор, главный научный сотрудник ПАО ПНППК (Пермь, Россия)

**Ответственный секретарь:** *Д.Б. Владимирова*, канд. физ.-мат. наук, доцент (Пермь, Россия)

**Редакционная коллегия:**

*Ю.Н. Кульчин*, акад. РАН (Владивосток, Россия)

*В.П. Матвеев*, акад. РАН (Пермь, Россия)

*М.П. Федорук*, акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор (Новосибирск, Россия)

*С.А. Бабин*, чл.-корр. РАН (Новосибирск, Россия)

*В.В. Шнак*, заместитель Министра промышленности и торговли РФ (Москва, Россия)

*А.А. Аполонский*, канд. физ.-мат. наук (Новосибирск, Россия)

*Н.А. Гиппиус*, д-р физ.-мат. наук, профессор (территория Инновационного центра «Сколково», Россия)

*В.П. Драчев*, канд. физ.-мат. наук (территория Инновационного центра «Сколково», Россия)

*В.В. Криштон*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Пермь, Россия)

*И.А. Лобач*, канд. физ.-мат. наук (Новосибирск, Россия)

*О. Г. Морозов*, д-р техн. наук, профессор (Казань, Россия)

*О.Е. Наний*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва, Россия)

*В.П. Первадчук*, д-р техн. наук, профессор (Пермь, Россия)

*А.В. Перминов*, д-р физ.-мат. наук, доцент (Пермь, Россия)

*Д.И. Семенов*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Ульяновск, Россия)

*С.Л. Семенов*, д-р физ.-мат. наук, руководитель НЦВО РАН (Москва, Россия)

*А.В. Сюй*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Долгопрудный, Россия)

*А.Л. Толстик*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Минск, Республика Беларусь)

*С.К. Турицын*, канд. физ.-мат. наук, профессор (Бирмингем, Англия)

*А.А. Фотиади*, канд. физ.-мат. наук (Ульяновск, Россия)

*В.Б. Цветков*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва, Россия)

*В.Я. Шур*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Екатеринбург, Россия)

*Ю.В. Чеботаревский*, д-р физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

*Zinan Wang* (王子南), Professor (Chengdu, China)

*Zhiyong Zhao* (赵志勇), Associate Professor (Wuhan, China)

Журнал «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), свидетельство ПИ № ФС 77 – 59184 от 3 сентября 2014 г.

Периодическое печатное издание (выходит 4 раза в год).

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Адрес учредителя, издателя, редакции и типографии:

614990, Пермский край, г. Пермь, пр-кт Комсомольский, д. 29.

Тел. +7 (342) 2-198-340, e-mail: [photonics.appl.jrn@gmail.com](mailto:photonics.appl.jrn@gmail.com).

# СОДЕРЖАНИЕ

---

<i>Н.М. Белозерова, Д.А. Кислов, И.Д. Медведев, И.Н. Крупатин, И.А. Завидовский, А.В. Сюй, А.С. Шалин, А.А. Вишневый, А.В. Арсенин, А.Д. Большаков, С.М. Новиков</i>	
Комбинационное рассеяние света от кремниевых резонансных Ми-войдов.....	5
<i>И.Д. Медведев</i>	
Об эффекте исключительных точек в полностью диэлектрической метаповерхности.....	20
<i>И.Д. Медведев</i>	
Оптический отклик фотонной периодической двумерной структуры в состоянии исключительной точки.....	28
<i>В.А. Симонов, Е.В. Голиков, В.С. Терентьев, А.В. Достовалов</i>	
ВБР в бессердцевинном кварцевом волокне для измерения высоких температур .....	35
<i>К.А. Овчинников</i>	
Исследование влияния температуры на оптическую схему резонаторного волоконно-оптического гироскопа.....	50
Условия публикации статей в журнале «Прикладная фотоника (Applied photonics)» .....	59

# CONTENTS

---

<i>N.M. Belozerova, D.A. Kislov, I.D. Medvedev, I.N. Krupatin, I.A. Zavidovsky, A.V. Xu, A.S. Shalin, A.A. Vishnev, A.V. Arsenin, A.D. Bolshakov, S.M. Novikov</i>	
Raman scattering from silicon resonant Mie-voids .....	5
<i>I.D. Medvedev</i>	
On the Exceptional Points effect in All-Dielectric Metasurface .....	20
<i>I.D. Medvedev</i>	
On the Optical response of All-Dielectric Metasurface in the Exceptional Point .....	28
<i>V.A. Simonov, E.V. Golikov, V.S. Terentyev, A.V. Dostovalov</i>	
FBG in coreless silica fiber for high temperature measurements .....	35
<i>K.A. Ovchinnikov</i>	
Study of the influence of temperature on the optical scheme of a resonator fiber-optic gyroscope .....	50
Terms of publication of articles in the journal "Applied photonics".....	59

УДК 535.338.32

**Н.М. Белозерова<sup>1,2</sup>, Д.А. Кислов<sup>1</sup>, И.Д. Медведев<sup>1</sup>,  
И.Н. Крупатин<sup>3</sup>, И.А. Завидовский<sup>1</sup>, А.В. Сюй<sup>1</sup>, А.С. Шалин<sup>1</sup>,  
А.А. Вишневыи<sup>1</sup>, А.В. Арсенин<sup>1</sup>, А.Д. Большаков<sup>1</sup>, С.М. Новиков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Российская Федерация

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

<sup>3</sup>Сколковский 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 нанопотонике. 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 нанопотонных 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<sup>1,2</sup>, D.A. Kislov<sup>1</sup>, I.D. Medvedev<sup>1</sup>, I.N. Krupatin<sup>3</sup>,  
I.A. Zavidovsky<sup>1</sup>, A.V. Suy<sup>1</sup>, A.S. Shalin<sup>1</sup>, A.A. Vishnevyy<sup>1</sup>,  
A.V. Arsenin<sup>1</sup>, A.D. Bolshakov<sup>1</sup>, S.M. Novikov<sup>1</sup>**

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

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

<sup>3</sup>Skolkovo 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/TiO<sub>2</sub> [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).

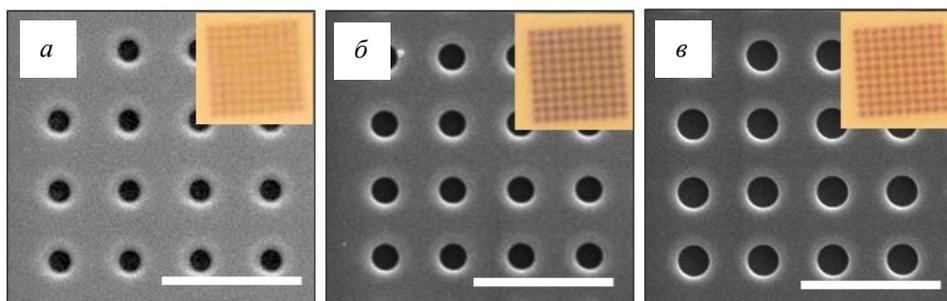


Рис. 1. Изображения Ми-войдов с радиусами (а) 250 нм; (б) 350 нм; (в) 450 нм, полученные на сканирующем электронном микроскопе; величина размерной метки 5 мкм; во вставках представлены оптические изображения соответствующих образцов (объектив  $\times 10$ )

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.

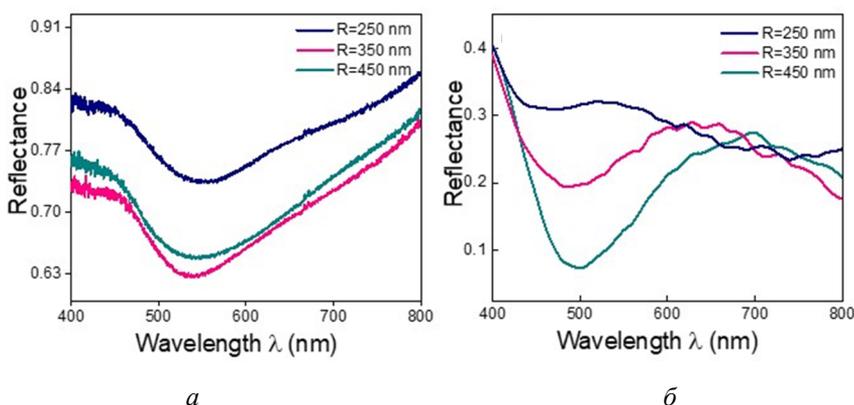


Рис. 2. Экспериментальные (*a*) и расчетные (*б*) спектры отражения от метаповерхности из резонансных Ми-войдов разного радиуса в кремниевой подложке; в расчете глубина для всех образцов была неизменной и равнялась 400 нм; геометрия полостей и диапазон размеров соответствуют экспериментальным данным

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  $\sim 1,8$  мкм<sup>2</sup>. Спектры комбинационного рассеяния регистрировались при падающей мощности 2,2 мВт и времени интегрирования 1 с в каждой выбранной точке. Максимальный размер карты составлял  $20 \times 20$  мкм. Спектры регистрировались с шагом 0,5 мкм. Для картирования использовался пик кремния  $520,7$  см<sup>-1</sup>. 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<sup>-1</sup>) 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.

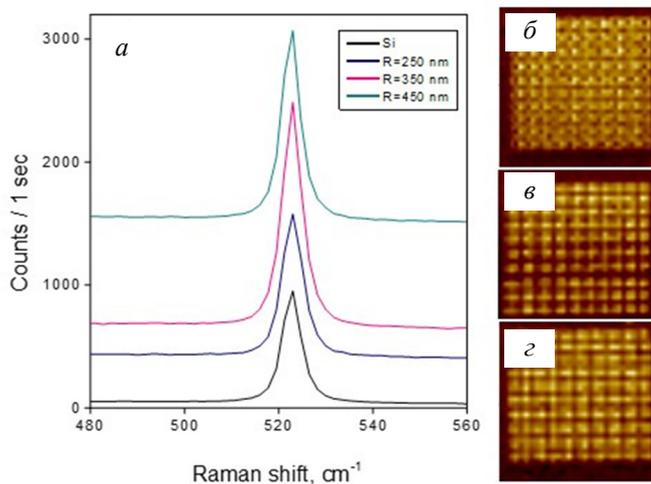


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния (*a*), полученные на необработанной кремниевой пластине и на Ми-войдах с фиксированной глубиной и разным радиусом; КР карты массивов Ми-войдов с радиусом (*б*) 250 нм, (*в*) 350 нм, (*з*) 450 нм соответственно

**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).

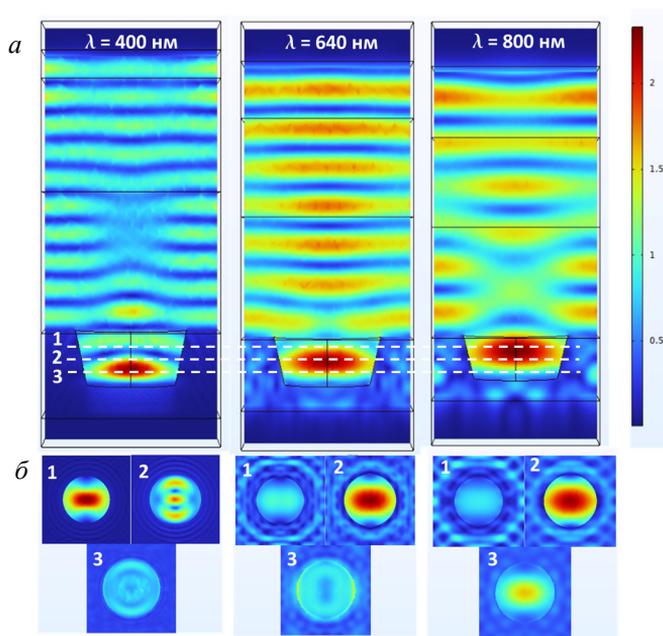


Рис. 4. Пространственное распределение абсолютной величины электрического поля (*а*) в продольном сечении расчетной области; в трех поперечных сечениях внутри нанополости (*б*); результаты расчета приведены для метаповерхности с радиусом войда 450 нм и глубиной 400 нм

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).

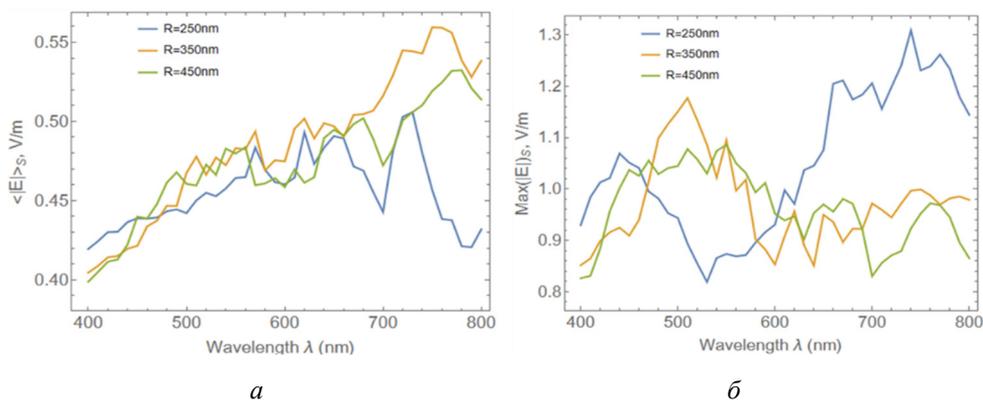


Рис. 5. Зависимость нормы электрического поля от длины волны падающего излучения: *а* – среднее по поверхности Ми-войда; *б* – максимальное значение на поверхности Ми-войда

### 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/TiO<sub>2</sub> 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/TiO<sub>2</sub> 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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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., Vishnevyy 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.

УДК 681.586.5

**И.Д. Медведев**

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

**ОБ ЭФФЕКТЕ ИСКЛЮЧИТЕЛЬНЫХ ТОЧЕК  
В ПОЛНОСТЬЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ**

Полностью диэлектрические неэрмитовы структуры позволяют получать уникальные эффекты, одним из которых является появление исключительных точек (ИТ) в спектре собственных значений системы. Фундаментальным результатом такого эффекта является то, что структура в состоянии ИТ чувствительна к небольшим изменениям параметров окружающей среды, например показателя преломления, что можно широко использовать в сенсорах, оптических усилителях, лазерных гироскопах и других областях. В данной работе исследована исключительная точка в системе, состоящей из двух кремниевых параллелепипедов на стеклянной подложке с изменяющимся углом раскрытия между ними, причем данный эффект получен нарушением симметрии метаповерхности только в плоскости. Кроме того, была изучена зависимость оптического отклика системы от небольшого изменения ее геометрических параметров. Основное преимущество нашего подхода заключается в упрощенном способе экспериментального контроля ИТ. Как следствие, результаты данной работы имеют потенциал значительно упростить процесс производства фотонных устройств с разнообразными функциями.

**Ключевые слова:** неэрмитовы структуры, полностью диэлектрическая метаповерхность, исключительная точка, диэлектрическая нанопотоника.

**I.D. Medvedev**

Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation

**ON THE EXCEPTIONAL POINTS EFFECT  
IN ALL-DIELECTRIC METASURFACE**

All-dielectric non-Hermitian structures make it possible to obtain unique effect like the appearance of the exceptional points (EP). A system at EP is sensitive to a small perturbation of refractive index, which can be widely used in different ways, such as EP-based sensors, optical amplifiers, laser gyroscopes and other fields. In this study, we investigate an exceptional point in two-rectangle system with varying opening angle which can be defined as a structure with only in-plane symmetry breaking. Furthermore, the effect dependance of geometry parameters has been studied. The main advantage of our geometric approach is the simplified way to experimental control an EP. Consequently, this effect has the potential to significantly simplify the manufacturing process of photonic devices with diverse functionalities.

**Keywords:** Non-Hermitian structures, All-Dielectric metasurface, Exceptional Point, Dielectric nanophotonics.

## **Введение**

В настоящее время существует значительный интерес к исследованию оптических свойств полностью диэлектрических систем. Эти системы предоставляют новые возможности для проектирования различных устройств и совершенствования уже существующих технологий. За счёт своих характеристик, таких как низкие потери и высокая эффективность, эти структуры способствуют развитию наноантенн [1], нанолазеров [2], сенсоров [3], метаматериалов [4], метаповерхностей [5] и других приложений [6].

Неэрмитовы системы заслуживают особого внимания из-за их способности порождать спектральные сингулярности, при которых как собственные значения, так и собственные векторы этих структур совпадают. Этот эффект также известен в литературе как исключительная точка (ИТ) [7–9]. Основной особенностью этого явления является резкое увеличение чувствительности системы к малым изменениям характеристик окружающей среды, например показатель преломления [9]. Это предоставляет ряд значимых преимуществ при проектировании различных датчиков, лазерных гироскопов и оптических усилителей.

Для достижения исключительной точки может быть использована одиночная частица несферической формы или структура с нарушением симметрии. В последнее время было проведено множество исследований различных геометрических структур для наблюдения и контроля ИТ [7, 8]. Однако иногда трудно получить возможность легкого контроля ИТ в структуре со сложной геометрией в эксперименте.

В данной работе мы предлагаем новый подход к проектированию метаповерхностей для исследования исключительных точек. В работе реализована геометрия структуры, элементарный домен которой состоит из двух кремниевых параллелепипедов на стеклянной подложке с изменяющимся углом раскрытия между ними. Одним из значимых плюсов предлагаемого подхода является упрощенный экспериментальный подход к проектированию, наблюдению и контролю ИТ. Также в данной работе мы демонстрируем оптический отклик метаповерхности, построенной с помощью описанного элементарного домена, а также изучаем влияние малых возмущений геометрических параметров такой системы.

## Исключительная точка в метаповерхности

Эффект появления исключительной точки в изолированной наночастице был подробно изучен ранее [8]. Кроме того, в указанной работе была предложена математическая модель решения задачи на поиск собственных значений в геометрии усеченного конуса. Нам было интересно распространить этот подход на предлагаемую геометрию метаповерхности только с потерями (рисунок). Одним из наиболее заметных преимуществ этой структуры является более доступная экспериментальная фабрикация.

Рисунок демонстрирует эффект исключительной точки в полностью диэлектрической неэрмитовой периодической двумерной структуре, элементарная ячейка которой состоит из двух кремниевых параллелепипедов на стеклянной подложке. Такой эффект возможен в данной системе ввиду нарушения симметрии в плоскости.

Изучена была предложенная структура путем численного расчета *ab initio* в программном пакете COMSOL Multiphysics в домене «Волновая оптика». Для достижения экспериментально наблюдаемых результатов были использованы реальные зависимости показателей преломления от длины волны всех использованных материалов (кристаллического кремния, стекла).

Элементарная ячейка изучаемой метаповерхности показана на рисунке, *а*. Два кремниевых параллелепипеда с линейными размерами  $L_1 = 304$  нм,  $L_2 = 100$  нм,  $L_3 = 240$  нм расположены на расстоянии  $d = 70$  нм между их границами под небольшим углом раскрытия между ними. Они помещены на полубесконечную стеклянную подложку. Варьируемым параметром системы является угол раскрытия ( $\theta \in [0^\circ, 20^\circ]$ ) между параллелепипедами. Еще раз отметим, что данная система периодическая и представляет из себя бесконечную двумерную поверхность, составленную из описанных выше элементов.

На рисунке, *б* показано численно рассчитанное мультипольное разложение сечения рассеяния элементарной ячейки (*а*) с фиксированным углом, при котором достигается исключительная точка. Данный результат был получен с использованием *finite difference time domain* (FDTD) – метода, который реализован в программном пакете ANSYS Lumerical. Исходя из анализа мультипольного разложения, заключаем, что искомый эффект должен проявляться вблизи длины волны 850 нм.

Численно рассчитанный спектр отражения метаповерхности изображен на рисунке, *в*. Кроме того, спектр отражения с возмущенными геометрическими параметрами метаповерхности показан на рисунке, *г*.

Можно также отметить, что на рисунке, *в* наблюдается особое резонансное отражение вблизи длины волны 850 нм. Это означает, что система, действительно, была настроена в состояние исключительной точки, и, кроме того, существует некоторая значимая чувствительность к изменению геометрических параметров, поскольку на рисунке, *г* резонансное отражение имеет меньшую добротность по сравнению с отражением системы с исходными параметрами.

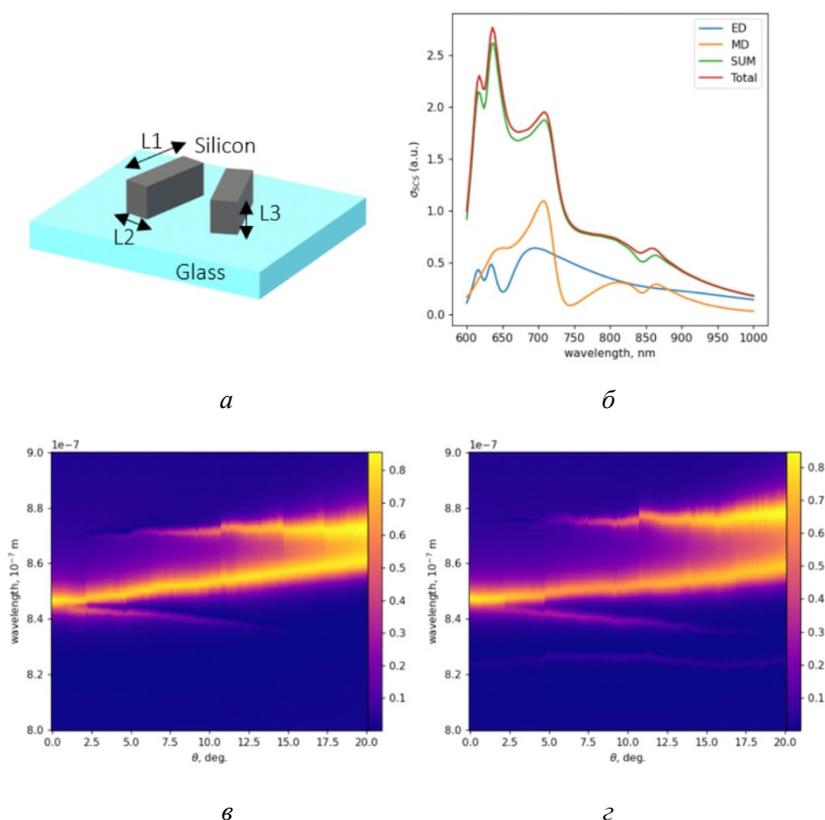


Рис. Исключительная точка в диэлектрической метаповерхности системы двух параллелепипедов: *а* – элементарный домен исследуемой системы ( $L1 = 304$  нм,  $L2 = 100$  нм,  $L3 = 240$  нм); *б* – мультипольная декомпозиция исследуемого изолированного домена; *в-г* – численно моделированные спектры отражения метаповерхности, набранной из доменов рисунка, *а*, где рисунок, *в* соответствует параметрам рисунка, *а*, в то время как на рисунке, *г* система с возмущенной геометрией ( $L1 = 314$  нм,  $L3 = 230-250$  нм)

Особое резонансное отражение вблизи исключительной точки можно использовать как способ детектирования изменения параметров окружающей среды. Это возможно ввиду фундаментального теоретического результата о том, что модуль сдвига резонансных частот в спектре отражения метаповерхности обладает квадратно-корневой зависимостью от пертурбации внешнего параметра системы. Наиболее доступным контролируемым параметром часто оказывается показатель преломления, что открывает дорогу для разработки новых фотонных устройств с возможным применением в химической или горнодобывающей промышленности.

### **Выводы**

В данной работе был продемонстрирован эффект исключительных точек в диэлектрической неэрмитовой метаповерхности с нарушением симметрии только в плоскости. Этот эффект может быть широко использован в сенсорах на основе ИТ, оптических усилителях и других областях производства фотонных устройств.

Кроме того, был исследован оптический отклик такой структуры. Особый интерес представляет резонансное отражение вблизи исключительной точки, которое может быть использовано для применения в сенсорах показателя преломления.

Важно отметить, что наш подход к проектированию метаповерхности является более эффективным с экспериментальной точки зрения, поскольку позволяет гибко управлять геометрическими параметрами системы, например, за счет изменения угла раскрытия между двумя параллелепипедами. Таким образом, результаты данной работы имеют широкое применение в проектировании нанофотонных устройств.

### **Список литературы**

1. Nano-antennas based on silicon-gold nanostructures / A. Kucherik, S. Kutrovskaya, A. Osipov, M. Gerke, I. Chestnov, S. Arakelian, A.S. Shalin, A.B. Evlyukhin, A.V. Kavokin // *Sci Rep.* – 2019. – Vol. 9. – P. 338.
2. CPA-lasing associated with the quasibound states in the continuum in asymmetric non-hermitian structures / D.V. Novitsky, A.C. Valero, A. Krotov, T. Salgals, A.S. Shalin, A.V. Novitsky // *ACS Photonics.* – 2022. – Vol. 9. – P. 3035–3042.

3. Transparent hybrid anapole metasurfaces with negligible electromagnetic coupling for phase engineering / A.V. Kuznetsov, A. Canós Valero, M. Tarkhov, V. Bobrovs, D. Redka, A.S. Shalin // *Nanophotonics*. – 2021. – Vol. 10. – P. 4385–4398.

4. Nanoscale tunable optical binding mediated by hyperbolic metamaterials / N.A. Kostina, D.A. Kislov, A.N. Ivinskaya, A. Proskurin, D.N. Redka, A. Novitsky, P. Ginzburg, A.S. Shalin // *ACS Photonics*. – 2020. – Vol. 7. – P. 425–433.

5. Theory, observation, and ultrafast response of the hybrid anapole regime in light scattering / A. Canós Valero, E.A. Gurvitz, F.A. Benimetskiy, D.A. Pidgayko, A. Samusev, A.B. Evlyukhin, V. Bobrovs, D. Redka, M.I. Tribelsky, M. Rahmani, K.Z. Kamali, A.A. Pavlov, A.E. Miroshnichenko, A.S. Shalin // *Laser Photon Rev.* – 2021. – Vol. 15. – P. 2100114.

6. Kuznetsov, A.V. Methods for dynamics control of the optical properties of single high-index all-dielectric nanoparticles located on substrates with 2D materials. Lecture notes in networks and systems / A.V. Kuznetsov, I.D. Medvedev, V. Bobrovs // Springer. – 2024. – Vol. 4. – P. 339–343.

7. Medvedev, I.D. Exceptional points in all-dielectric structure with only in-plane symmetry breaking. Lecture notes in networks and systems / I.D. Medvedev, A.V. Kuznetsov, V. Bobrovs // Springer. – 2024. – Vol. 4. – P. 184–188.

8. Bianisotropic exceptional points in an isolated dielectric nanoparticle / A. Canós Valero, V. Bobrovs, T. Weiss, L. Gao, A.S. Shalin, Y. Kivshar // *Phys. Rev. Res.* – 2024. – Vol. 6. – P. 013053.

9. Wiersig, J. Review of exceptional point-based sensors / J. Wiersig // *Photonics Res.* – 2020. – Vol. 8. – P. 1457.

## References

1. Kucherik A., Kutrovskaia S., Osipov A., Gerke M., Chestnov I., Arakelian S., Shalin A.S., Evlyukhin A.B., Kavokin A.V. Nano-antennas based on silicon-gold nanostructures. *Sci Rep*, 2019, vol. 9, p. 338.

2. Novitsky D.V., Valero A.C., Krotov A., Salgals T., Shalin A.S., Novitsky A.V. CPA-lasing associated with the quasibound states in the continuum in asymmetric non-hermitian structures. *ACS Photonics*, 2022, vol. 9, pp. 3035-3042.

3. Kuznetsov A.V., Canós Valero A., Tarkhov M., Bobrovs V., Redka D., Shalin A.S. Transparent hybrid anapole metasurfaces with negligible electromagnetic coupling for phase engineering. *Nanophotonics*, 2021, vol. 10, pp. 4385-4398.

4. Kostina N.A., Kislov D.A., Ivinskaya A.N., Proskurin A., Redka D.N., Novitsky A., Ginzburg P., Shalin A.S. Nanoscale tunable optical binding mediated by hyperbolic metamaterials. *ACS Photonics*, 2020, vol. 7, pp. 425-433.

5. Canós Valero A., Gurvitz E.A., Benimetskiy F.A., Pidgayko D.A., Samusev A., Evlyukhin A.B., Bobrovs V., Redka D., Tribelsky M.I., Rahmani M., Kamali K.Z., Pavlov A.A., Miroshnichenko A.E., Shalin A.S. Theory, observation, and ultrafast response of the hybrid anapole regime in light scattering. *Laser Photon Rev*, 2021, vol. 15, p. 2100114.

6. Kuznetsov A.V., Medvedev I.D., Bobrovs V. Methods for dynamics control of the optical properties of single high-index all-dielectric nanoparticles located on substrates with 2D materials. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, 2024, vol. 4, pp. 339-343.

7. Medvedev I.D., Kuznetsov A.V., Bobrovs V. Exceptional points in all-dielectric structure with only in-plane symmetry breaking. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, 2024, vol. 4, pp. 184-188.

8. Canós Valero A., Bobrovs V., Weiss T., Gao L., Shalin A.S., Kivshar Y. Bianisotropic exceptional points in an isolated dielectric nanoparticle. *Phys. Rev. Res.*, 2024, vol. 6, p. 013053.

9. Wiersig J. Review of exceptional point-based sensors. *Photonics Res.*, 2020, vol. 8, p. 1457.

#### Сведения об авторе

**МЕДВЕДЕВ И.Д.**

e-mail: [ilia.dmit.medvedev@gmail.com](mailto:ilia.dmit.medvedev@gmail.com)

Студент Московского физико-технического института, техник Международной лаборатории контролируемых оптических наноструктур Московского физико-технического института, г. Москва.

#### About the author

**I.D. MEDVEDEV**

e-mail: [ilia.dmit.medvedev@gmail.com](mailto:ilia.dmit.medvedev@gmail.com)

Student of Moscow Institute of Physics and Technology, Technician, International Laboratory of Tunable Optical Nanostructures, Moscow.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-72-00037.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад автора** 100 %.

**Получена:** 07.10.2024

**Одобрена:** 10.10.2024

**Принята к публикации:** 12.10.2024

**Financing.** The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-72-00037.

**Conflict of Interest.** The author declare no conflict of interest.

**Author's Contributions** is 100 %.

**Received:** 07/10/2024

**Approved:** 10/10/2024

**Accepted for publication:** 12/10/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Медведев, И.Д. Об эффекте исключительных точек в полностью диэлектрической метаповерхности / И.Д. Медведев // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 4. – С. 20–27.

Please cite this article in English as: Medvedev I.D. On the Exceptional Points effect in All-Dielectric Metasurface. *Applied Photonics*, 2024, vol. 11, no. 4, pp. 20-27.

УДК 681.586.5

**И.Д. Медведев**

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

## **ОПТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ФОТОННОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ДВУМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ В СОСТОЯНИИ ИСКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ ТОЧКИ**

Диэлектрическая нанофотоника использует материалы с высоким показателем преломления для манипулирования светом на наноуровне с минимальными потерями энергии, обеспечивая сильный электрический и магнитный резонанс. Такая способность делает полностью диэлектрические структуры идеальными для целого ряда передовых фотонных приложений: от ультратонких линз до сенсоров. В данной работе мы изучаем мультипольный отклик полностью диэлектрических метаповерхностей вблизи исключительной точки (ИТ) – спектральной сингулярности в неэрмитовых системах, где происходит слияние собственных мод системы. Численное моделирование показывает, что в ИТ резонанс метаповерхности расщепляется со значительным вкладом магнитных дипольных (MD) и электрических квадрупольных (EQ) мод. Эти результаты расширяют наше понимание ИТ в физике метаповерхностей и укрепляют потенциал этой геометрии для приложений в фотонных устройствах.

**Ключевые слова:** неэрмитовы структуры, полностью диэлектрическая метаповерхность, мультипольная декомпозиция, сечение рассеяния, исключительная точка, диэлектрическая нанофотоника.

**I.D. Medvedev**

Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation

## **ON THE OPTICAL RESPONSE OF ALL-DIELECTRIC METASURFACE IN THE EXCEPTIONAL POINT**

All-dielectric nanophotonics leverages high-refractive-index dielectric materials to manipulate light at the nanoscale with minimal energy loss, offering strong electric and magnetic resonances. These properties make all-dielectric structures ideal for a range of advanced photonic applications, from ultra-thin lenses to sensors. In this study, we explore the multipole response of all-dielectric metasurfaces when operating near an exceptional point (EP), a singularity in non-Hermitian systems where eigenmodes coalesce. Numerical simulations reveal that at the EP, the metasurface's resonance splits, with significant contributions from magnetic dipole (MD) and electric quadrupole (EQ) modes. These findings enhance our understanding of EPs in metasurface physics and highlight the potential of this geometry for applications in photonic devices.

**Keywords:** Non-Hermitian structures, All-Dielectric metasurface, Exceptional Point, Multipole Decomposition, Scattering cross-section, Dielectric nanophotonics.

## **Введение**

Полностью диэлектрическая нанофотоника, быстро развивающаяся область фотоники, фокусируется на манипулировании и управлении светом в наномасштабе с помощью диэлектрических материалов с высоким показателем преломления. В отличие от своих плазмонных аналогов, использующих металлы при построении структур и, как следствие, имеющих значительные омические потери [1], полностью диэлектрические структуры минимизируют рассеивание энергии, обеспечивая при этом сильный электрический и магнитный резонанс [2]. Эти резонансы позволяют реализовать различные оптические явления, такие как резонанс Фано [3], связанные состояния в континууме (VICs) [4] и направленное рассеяние [5]. Способность управлять этими эффектами на наноуровне привела к созданию новых устройств для различных применений – от ультратонких линз и голограмм до сенсоров и нелинейной оптики [6–9]. Эта область вызывает значительный интерес благодаря своему потенциалу сочетать работу с малыми потерями, компактностью и универсальностью, необходимыми для интеграции в фотонные системы следующего поколения.

В последние годы полностью диэлектрические метаповерхности стали мощной платформой для манипулирования электромагнитным излучением. Такие структуры, характеризующиеся субволновыми характеристиками и высокоиндексными материалами, открыли новые возможности в фотонике и позволят реализовать разные эффекты, такие как управление лучом, контроль поляризации, спектральная фильтрация и другие. Особенно интересным аспектом метаповерхностей является их поведение в окрестности исключительных точек (ИТ) [7–9] – сингулярностей в пространстве геометрических параметров неэрмитовых систем, в которых сливаются две или более собственные моды. Исключительные точки известны своими уникальными свойствами, такими как повышенная чувствительность к небольшому изменению параметров окружающей, что делает их привлекательными для фотонных приложений.

В данной работе рассматривается мультипольный оптический отклик [10] полностью диэлектрических метаповерхностей вблизи исключительной точки. С помощью численного моделирования демонстрируется, что отклик метаповерхности изменяется вблизи ИТ, что открывает потенциальные возможности для применения в сенсорике, манипулировании светом, а также в фотонных устройствах.

Результаты этой работы способствуют более глубокому пониманию роли исключительных точек в физике метаповерхности, предлагая подход к разработке фотонных компонентов следующего поколения, которые используют уникальные свойства ИТ для повышения производительности и функциональности.

### **Оптический отклик метаповерхности в исключительной точке**

В этой работе мы концентрируемся на оптическом отклике периодической, полностью диэлектрической системы, находящихся в двух принципиально разных состояниях. Данный подход позволяет понять вклад эффекта исключительной точки в отклик системы.

На рисунке иллюстрируется общий мультипольный отклик полностью диэлектрической метаповерхности с нарушением симметрии в плоскости. Исследуемая система изображена на рисунках *а* и *б*, где изменяемым параметром является угол раскрытия между параллелепипедами, как показано на рисунке, *б*. Основные результаты, численно рассчитанные с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics, представлены на рисунках *в* и *г*, где показан мультипольный оптический отклик системы.

Для достижения исключительной точки в полностью диэлектрической метаповерхности был использован метод нарушения симметрии только в плоскости. Исследованная структура представляет из себя периодическую двумерную диэлектрическую поверхность в полубесконечном пустом пространстве с показателем преломления  $n = 1$ , элементарный элемент которой состоит из двух кремниевых параллелепипедов с линейными размерами  $L_1 = 304$  нм,  $L_2 = 100$  нм,  $L_3 = 240$  нм, расположенных на полубесконечной стеклянной подложке. При этом расстояние между их границами фиксировано и составляет  $d = 70$  нм (см. рисунок, *а*, *б*).

Изменяя угол раскрытия между двумя параллелепипедами в элементарной ячейке метаповерхности, нарушается внутривоскостная симметрия, что приводит к спариванию двух собственных мод. Это взаимодействие позволяет проявиться в структуре эффекту исключительной точки (ИТ), как показано на рисунок, *г*. Примечательно, что эта геометрия обладает экспериментальным потенциалом благодаря простому контролю параметров системы.

Бесконечность внешней среды и подложки имитировались при помощи расположения сверху и снизу расчетной области идеально согласованных слоев (PML). Для моделирования периодических структур в модели были наложены соответствующие периодические граничные условия. Система возбуждалась плоской монохроматической, нормально падающей волной. Для осуществления такого падения над системой в модели была определена система периодических портов.

При численном моделировании использовались экспериментальные данные показателя преломления описанных материалов структуры, учитывая их зависимость от частоты возбуждающего излучения плоской монохроматической волной.

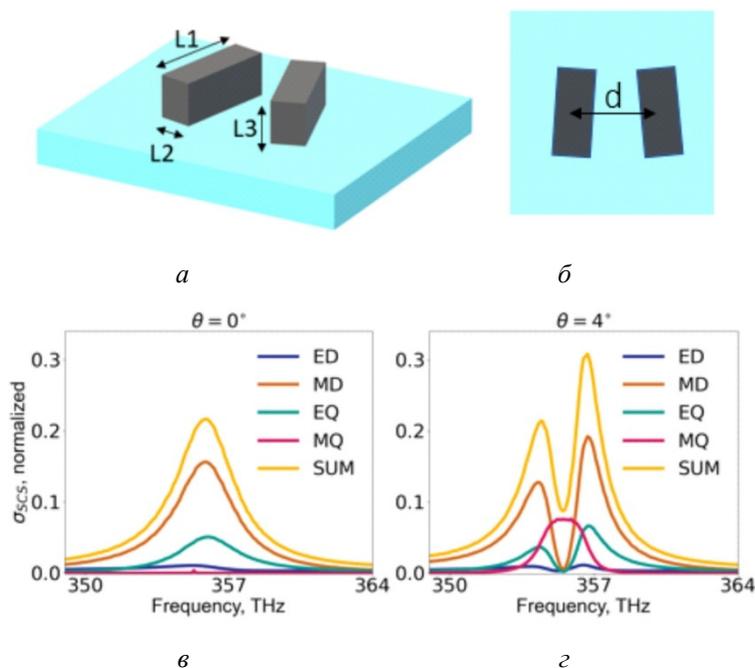


Рис. Мультипольный отклик метаповерхности: *a–б* – элементарный домен исследуемой системы ( $L_1 = 304$  нм,  $L_2 = 100$  нм,  $L_3 = 240$  нм) в перспективе (*a*) и в виде сверху (*б*); *в–г* – мультипольная декомпозиция исследуемого изолированного домена в случаях ИТ (*в*) и не ИТ (*г*)

Как видно из рисунка, *г*, в исключительной точке начальный резонанс расщепляется на два со значительным вкладом магнитного диполя (MD) и электрического квадруполь (EQ). Иными словами, нарушенная симметрия приводит к усилению вклада отмеченных мультиполей. Эти две мультипольные моды начинают «сцепляться» и формировать новый

резонансный пик, что является признаком эффекта исключительной точки. Стоит также отметить, что влияние магнитного квадруполья (MQ) в этом случае не связано со связанными модами MD и EQ.

Геометрическое управление оптическим откликом через угол раскрытия подчеркивает гибкость исследуемой метаповерхности и её потенциал в экспериментальных и фотонных приложениях. Возможность настройки резонансных частот и усиления определённых мод за счет управления симметрией открывает перспективы для создания активных оптических устройств, таких как фильтры, сенсоры и резонаторы с высокой добротностью.

Исключительные точки благодаря своим уникальным физическим свойствам могут обеспечить повышенную чувствительность к изменениям окружающих условий, что также полезно для сенсорных применений.

### Выводы

В данной работе исследован мультипольный оптический отклик полностью диэлектрической метаповерхности с нарушением симметрии в плоскости в исключительной точке. Полученные нами результаты способствуют более глубокому пониманию физических механизмов, лежащих в основе возникновения исключительных точек.

Кроме того, эта геометрия демонстрирует значительный потенциал для использования в сенсорах и других фотонных устройствах, поскольку она обеспечивает гибкий экспериментальный контроль над параметрами конструкции.

### Список литературы

1. Nano-opto-mechanical effects in plasmonic waveguides / A.S. Shalin, P. Ginzburg, P.A. Belov, Y.S. Kivshar, A.V. Zayats // *Laser Photon Rev.* – 2014. – Vol. 8. – P. 131–136.
2. Magnetic octupole response of dielectric quadrumers / P.D. Terekhov, A.B. Evlyukhin, D. Redka, V.S. Volkov, A.S. Shalin, A. Karabchevsky // *Laser Photon Rev.* – 2020. – Vol. 14.
3. Miroshnichenko, A.E. Fano resonances in nanoscale structures / A.E. Miroshnichenko, S. Flach, Y.S. Kivshar // *Rev. Mod. Phys.* – 2010. – Vol. 82. – P. 2257–2298.
4. Topological nature of optical bound states in the continuum / B. Zhen, C.W. Hsu, L. Lu, A.D. Stone, M. Soljačić // *Phys. Rev. Lett.* – 2014. – Vol. 113. – P. 257401.

5. Special scattering regimes for conical all-dielectric nanoparticles / A.V. Kuznetsov, A. Canós Valero, H.K. Shamkhi, P. Terekhov, X. Ni, V. Bobrovs, M.V. Rybin, A.S. Shalin // *Sci Rep.* – Vol. 202, № 12. – P. 21904.
6. Kuznetsov, A.V. Methods for dynamics control of the optical properties of single high-index all-dielectric nanoparticles located on substrates with 2D materials. Lecture notes in networks and systems / A.V. Kuznetsov, I.D. Medvedev, V. Bobrovs // Springer. – 2024. – Vol. 4. – P. 339–343.
7. Medvedev, I.D. Exceptional points in all-dielectric structure with only in-plane symmetry breaking. Lecture notes in networks and systems / I.D. Medvedev, A.V. Kuznetsov, V. Bobrovs // Springer. – 2024. – Vol. 4. – P. 184–188.
8. Bianisotropic exceptional points in an isolated dielectric nanoparticle / A. Canós Valero, V. Bobrovs, T. Weiss, L. Gao, A.S. Shalin, Y. Kivshar // *Phys Rev Res.* – 2024. – Vol. 6. – P. 013053.
9. Wiersig, J. Review of exceptional point-based sensors / J. Wiersig // *Photonics Res.* – 2020. – Vol. 8. – P. 1457.
10. Alae, R. An electromagnetic multipole expansion beyond the long-wavelength approximation / R. Alae, C. Rockstuhl, I. Fernandez-Corbaton // *Optics Communications.* – 2018. – Vol. 407. – P. 17–21.

## References

1. Shalin A.S., Ginzburg P., Belov P.A., Kivshar Y.S., Zayats A.V. Nano-opto-mechanical effects in plasmonic waveguides. *Laser Photon Rev*, 2014, vol. 8, pp. 131-136.
2. Terekhov P.D., Evlyukhin A.B., Redka D., Volkov V.S., Shalin A.S., Karabchevsky A. Magnetic octupole response of dielectric quadrumers. *Laser Photon Rev*, 2020, vol. 14.
3. Miroshnichenko A.E., Flach S., Kivshar Y.S. Fano resonances in nanoscale structures. *Rev. Mod. Phys.*, 2010, vol. 82, pp. 2257-2298.
4. Zhen B., Hsu C.W., Lu L., Stone A.D., Soljačić M. Topological nature of optical bound states in the continuum. *Phys. Rev. Lett.*, 2014, vol. 113, p. 257401.
5. Kuznetsov A.V., Canós Valero A., Shamkhi H.K., Terekhov P., Ni X., Bobrovs V., Rybin M.V., Shalin A.S. Special scattering regimes for conical all-dielectric nanoparticles. *Sci Rep*, vol. 202, no. 12, p. 21904.
6. Kuznetsov A.V., Medvedev I.D., Bobrovs V. Methods for dynamics control of the optical properties of single high-index all-dielectric nanoparticles located on substrates with 2D materials. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, 2024, vol. 4, pp. 339-343.
7. Medvedev I.D., Kuznetsov A.V., Bobrovs V. Exceptional points in all-dielectric structure with only in-plane symmetry breaking. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, 2024, vol. 4, pp. 184-188.

8. Canós Valero A., Bobrovs V., Weiss T., Gao L., Shalin A.S., Kivshar Y. Bianisotropic exceptional points in an isolated dielectric nanoparticle. *Phys. Rev. Res.*, 2024, vol. 6, p. 013053.

9. Wiersig J. Review of exceptional point-based sensors. *Photonics Res.*, 2020, vol. 8, p. 1457.

10. Alaei R., Rockstuhl C., Fernandez-Corbaton I. An electromagnetic multipole expansion beyond the long-wavelength approximation. *Optics Communications*, 2018, vol. 407, pp. 17-21.

#### Сведения об авторе

**МЕДВЕДЕВ И.Д.**

e-mail: [ilia.dmit.medvedev@gmail.com](mailto:ilia.dmit.medvedev@gmail.com)

Студент Московского физико-технического института, техник Международной лаборатории контролируемых оптических наноструктур Московского физико-технического института, г. Москва

#### About the author

**I.D. MEDVEDEV**

e-mail: [ilia.dmit.medvedev@gmail.com](mailto:ilia.dmit.medvedev@gmail.com)

Student of Moscow Institute of Physics and Technology, Technician, International Laboratory of Tunable Optical Nanostructures, Moscow

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-72-00037.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценный.

**Получена:** 10.10.2024

**Одобрена:** 14.10.2024

**Принята к публикации:** 15.10.2024

**Financing.** This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-72-00037.

**Conflict of Interest.** The author declare no conflict of interest.

**The authors contribution is 100 %.**

**Received:** 10/10/2024

**Approved:** 14/10/2024

**Accepted for publication:** 15/10/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Медведев, И.Д. Оптический отклик фотонной периодической двумерной структуры в состоянии исключительной точки / И.Д. Медведев // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 4. – С. 28–34.

Please cite this article in English as: Medvedev I.D. On the Optical response of All-Dielectric Metasurface in the Exceptional Point. *Applied photonics*, 2024, no. 4, pp. 28-34.

УДК 681.586.5

**В.А. Симонов<sup>1</sup>, Е.В. Голиков<sup>1</sup>, В.С. Терентьев<sup>1</sup>, А.В. Достовалов<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
Новосибирск, Российская Федерация<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет,  
Новосибирск, Российская Федерация

## **ВБР В БЕССЕРДЦЕВИННОМ КВАРЦЕВОМ ВОЛОКНЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР**

Впервые продемонстрирована возможность измерения высоких температур вплоть до 1200 °С с помощью ВБР с центральной длиной волны 985 нм, записанной в бессердцевинном чистокварцевом волокне методом фемтосекундной поточечной записи. При этом длина бессердцевинного волокна от ВБР до соединения с многомодовым транспортным волокном была не менее 50 см, а средняя температурная чувствительность составила около 9 пм/°С. Показано, что такая ВБР остается стабильной при температурах вплоть до 1150 °С в течение часа. При 1200 °С наблюдается деградация коэффициента отражения. Использование полностью многомодовой схемы опроса позволило существенно повысить интенсивность отраженного света и снизить влияние модовой интерференции на регистрируемый спектр ВБР, а выбор спектрального диапазона до 1100 нм позволяет использовать сравнительно недорогие спектральные приборы на основе кремниевых фотоприемников.

**Ключевые слова:** волоконные брэгговские решетки, ВБР-датчики, бессердцевинное волокно.

**V.A. Simonov<sup>1</sup>, E.V. Golikov<sup>1</sup>, V.S. Terentyev<sup>1</sup>, A.V. Dostovalov<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>Institute of Automation and Electrometry SB RAS,  
Novosibirsk, Russian Federation<sup>2</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

## **FBG IN CORELESS SILICA FIBER FOR HIGH TEMPERATURE MEASUREMENTS**

The paper demonstrates for the first time the possibility of measuring high temperatures up to 1200 °C using an FBG with central wavelength 985 nm formed in a coreless pure silica fiber using the femtosecond point-by-point FBG-writing technique. In our case, the length of the coreless fiber from the FBG to the connection with the multimode transport fiber was not less than 50 cm, and average temperature sensitivity was about 9 pm/°C. It is shown that such an FBG remains stable at temperatures up to 1150 °C for at least an hour. At 1200 °C, degradation of the reflectivity was observed. The use of a fully multimode interrogation scheme made it possible to significantly increase the intensity of reflected light and reduce the effect of mode interference on the obtained FBG spectrum, and the choice of a spectral range of up to 1100 nm makes it possible to use relatively inexpensive spectral devices based on silicon photodetectors.

**Keywords:** fiber Bragg gratings, FBG-sensors, coreless fiber.

## **Введение**

Точный контроль высокой температуры необходим в различных областях науки и техники. Например, измерение температуры в камере сгорания турбореактивных двигателей или в котлах и агрегатах котельных необходимо для повышения эффективности сгорания топлива, а также для предотвращения выхода на критические режимы работы. С одной стороны, возрастает экономичность эксплуатации и обслуживания, а с другой – снижается негативное влияние на экологию от выбросов продуктов горения. Самыми распространенными традиционными методами, по-видимому, являются терморезистивный, термоэлектрический и пирометрический [1]. Однако преимущества волоконных датчиков вообще и для измерения высоких температуры в частности состоят в их нечувствительности к электромагнитным помехам, стойкости ко многим агрессивным условиям среды, возможности их мультиплексирования в одной измерительной линии и осуществлении удаленных измерений.

В то же время наиболее распространенные волоконно-оптические датчики на основе ВБР, сформированные традиционным методом УФ-записи, хорошо работают при нормальных и низких температурах, вплоть до криогенных [2], но деградируют при температурах выше 300 °С. Существует техника регенерации таких УФ ВБР, позволяющая получить ВБР с долговременным рабочим диапазоном до 900 °С [3]. При повышении температуры до некоторого значения (около 300–500 °С, в зависимости от примесей в составе волокна) изначально сформированная периодическая структура сначала стирается – коэффициент отражения решетки существенно снижается, – а при дальнейшей выдержке решетка начинает восстанавливаться: коэффициент отражения начинает расти, хотя и остается ниже изначального. Этот эффект связывают с процессом кристаллизации в областях изначальной модификации, возникающей из-за изменения направления внутренних напряжений на границе сердцевин и оболочки [4]. Такие восстановленные ВБР (ВВБР, RFBG – regenerated fiber Bragg gratings) уже могут работать вплоть до температуры отжига. При этом предельные температуры зависят также от состава волокна, например, для ВВБР в волокне с высоколегированной бором (~ 20 мол. %) и германием (~ 33 мол. %) сердцевиной и легированной фосфором (~ 11 мол. %) и фтором (< 4 мол. %)

оболочкой продемонстрирована предельная достижимая рабочая температура в 1295 °С [5]. Хотя при этом ВБР сохранилась, волокно стало крайне хрупким, что критично в предполагаемых условиях работы датчика. К тому же время работы при такой температуре сравнительно невелико. Вариант такого датчика на ВВБР с рабочим диапазоном до 1000 °С был успешно опробован НАСА для измерения температуры выхлопа турбовентиляторного двигателя Pratt & Whitney F117 [6].

В последнее время стремительно развиваются методы импульсной фс лазерной записи структур показателя преломления, в том числе ВБР. Так, в частности, показано, что ВБР, записанные по данной методике, в одномодовых оптических волокнах могут без дополнительных манипуляций работать при гораздо больших температурах, чем записанные УФ излучением, – вплоть до 1000 °С [7].

Процесс деградации таких решеток начинается при температуре >1050 °С [8]. Эти ограничения связаны с эффектом температурного размягчения легированных материалов сердцевины и/или оболочки волокна. Так как оптические волокна содержат примеси в сердцевине и/или оболочке для формирования световедущей сердцевины, то их температура размягчения ниже, чем у чистого кварца.

Самыми высокотемпературными среди волоконных оптических датчиков являются, по-видимому, сформированные в сапфировых световодах на основе кристаллических стержней, которые способны выдерживать температуру до 2000 °С [9]. Однако их стоимость чрезвычайно высока по сравнению с кварцевыми оптическими волокнами, а техника опроса сложнее из-за большого количества направляемых поперечных мод и низкого качества боковой поверхности стержней, что приводит к большим потерям при распространении света, снижает максимальный коэффициент отражения ВБР и увеличивает ее спектральную ширину. Недавно продемонстрирована возможность одновременного формирования в таких стержнях одномодового волновода длиной 4 см и ВБР методом поточечной фс записи [10]. Несмотря на высокий коэффициент отражения таких ВБР в 90 %, на текущий момент потери в таком волноводе составляют около 1,5 дБ/см, что существенно ограничивает удаленность точки измерения от соединения с транспортным кварцевым волокном.

Как уже упоминалось, основным ограничением при использовании ВБР в стандартных волокнах является наличие легатов, снижающих

температуру размягчения составляющих материалов. В данной работе предлагается решение данной проблемы за счет применения ВБР, сформированных в чистокварцевом бессердцевинном волокне из высокочистого плавленого кварца, рабочая температура которого превышает 1100 °С. Например, для синтетических стекол марок Infracil и HOQ производства Heraeus допускается долговременная работа при температурах 1150 °С и кратковременная при 1300 °С, в то время как для марок Suprasil и Spectosil – до 950 °С и 1200 °С соответственно. Такие волокна совместимы со стандартными волокнами и оборудованием для создания систем мониторинга температуры и деформации. Стоимость бессердцевинных кварцевых волокон сравнительно невелика, но из-за отсутствия световедущей сердцевины, аналогично стержням из кристаллического сапфира, появляется ограничение на длину линии и чистоту поверхности, что снижает диапазон потенциальных применений. Также чистокварцевые волокна имеют высокую радиационную стойкость [11], что может быть востребовано в аэрокосмических и специальных применениях. При этом использование традиционной технологии УФ записи для формирования ВБР в таких типах волокон принципиально невозможно из-за отсутствия эффекта фоточувствительности в нелегированном кварцевом стекле. В то же время модификация показателя материала волокна возможна с помощью фс лазерных импульсов за счет нелинейного поглощения излучения при высокой интенсивности поля в области фокусировки [12].

На сегодняшний день продемонстрирована возможность формирования в бессердцевинном кварцевом волокне квазираспределенной линии из 10 ВБР в области 1440–1620 нм методом поточечной фс лазерной записи в 1 и 4 порядках [13, 14], при этом ВБР имела два слоя нанесенных от оси волокна на  $\pm 20$  мкм для увеличения интенсивности отражения. Для опроса использовался многомодовый спектрометр, длина каждой ВБР составляла 5 мм, а вся линия располагалась на расстоянии 10–20 см от соединения с транспортным многомодовым волокном. В работах продемонстрирована долговременная стабильность таких решеток в течение 24 часов при температуре 1100 °С, чувствительность около 15 пм/°С и хорошая циклическая повторяемость в течение 7 циклов нагрева и охлаждения от 500 °С до 1100 °С.

Основной целью данной работы является экспериментальная проверка возможности измерения температуры свыше 1100 °С с помощью

ВБР, сформированных поточечным методом с помощью фс лазерных импульсов в чистокварцевом бессердцевинном волокне. При этом предлагается использовать более коротковолновый спектральный диапазон 900–1000 нм, который представляется экономически более выгодным по сравнению со стандартным для телекоммуникационных и сенсорных применений 1500–1600 нм с точки зрения промышленного применения из-за существенно меньшей стоимости устройств опроса на основе кремниевых фотоприемных модулей. К тому же интенсивность температурного свечения зависит от длины волны как  $\lambda^{-5}$ , то есть влияние фоновой засветки в нашем случае будет меньше.

### 1. Методы и подходы

Образцы ВБР были созданы в кварцевом бессердцевинном световоде Thorlabs FG125LA с диаметром 125 мкм с помощью поточечного метода записи фемтосекундным лазерным излучением (длина волны 1026 нм, длительность импульсов 230 фс) с протяжкой световода через ферулу, при котором каждый штрих решетки создается одним лазерным импульсом, сфокусированным микрообъективом Mitutoyo 50x с числовой апертурой NA=0,55 в центральную область стержня (рис. 1, а) [12].

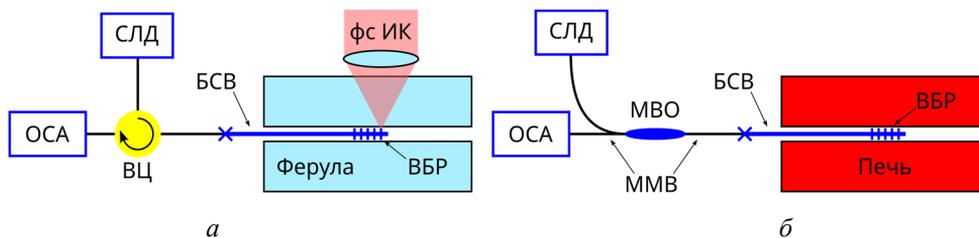


Рис. 1. Схема записи (а): СЛД – суперлюминесцентный диод, БСВ – бессердцевинное оптическое волокно, ОСА – оптический спектроанализатор, ВЦ – волоконный циркулятор; схема эксперимента (б): МВО – многомодовый волоконный ответвитель, ММВ – многомодовое оптическое волокно

При этом сам световод перемещался через точку фокусировки с постоянной скоростью высокоточным линейным позиционером при фиксированной частоте следования лазерных импульсов (1 кГц). Несмотря на возможность формирования ВБР без снятия акрилатной или полиимидной защитной оболочки при записи фс лазерными импульсами [15], в настоящей работе защитное покрытие удалялось, так как, во-первых, при нагреве выше 150 °С она сгорит и может деформировать

и загрязнить продуктами горения волокно, а, во-вторых, данное волокно предназначено для терминирования (подавления отражения и рассеивания излучения), поэтому имеет полимерную оболочку с показателем преломления выше, чем у кварца. Запись ВБР длиной 10 мм осуществлялась при фиксированной энергии импульсов  $\approx 1$  мкДж, при которой в материале происходит образование микропустот и локальных напряжений, что увеличивает эффективное значение модуляции показателя преломления.

Спектры отражения полученных ВБР (рис. 2) были измерены непосредственно после записи с помощью оптической схемы (см. рис. 1, а): излучение суперлюминесцентного диода (СЛД, Innolume SLD-1000-100-PM-25) с центральной длиной волны 1000 нм, шириной спектра  $>80$  нм и интегральной мощностью до 25 мВт проходило через волоконный циркулятор (ВЦ), проходило через сварное соединение одномодового и бессердцевинного волокон (БСВ), отражалось от ВБР и регистрировалось с помощью оптического анализатора спектров (ОСА, Yokogawa AQ6370). Расстояние от соединения с одномодовым волокном до сформированной ВБР при этом составляло 2–3 см. Стоит отметить, что в таком волноводе, который является многомодовым, поддерживается большое количество направляемых поперечных мод, которое определяется диаметром стержня (типичное значение 125 мкм) и разницей показателей преломления стержня и окружающей среды (0,44 для воздуха). При этом все эти моды взаимодействуют со сформированной ВБР, длина волны отражения уменьшается вместе с волновым числом моды, а коэффициент отражения пропорционален интегралу перекрытия профиля моды с поперечным сечением модификации показателя преломления. А так как размер мод существенно больше таковой для одномодового волокна (Coherent 1060-XP), то для отраженного излучения, зашедшего обратно в одномодовое волокно, характерны значительные потери, а в спектре отражения ВБР присутствует ярко выраженная интерференция мод. При этом, отличия в спектрах ВБР на рис. 2 может объясняться разницей положения штрихов в поперечном сечении для разных образцов из-за сложности фокусировки точно в центр волокна, так как отсутствует ориентир в виде сердцевинки.

Из-за описанных выше особенностей для проведения экспериментов по измерению температуры была использована многомодовая схема (см. рис. 1, б), в которой излучение суперлюминесцентного диода (СЛД)

заходило в многомодовый волоконный ответвитель (МВО, Thorlabs TM105FS1B). В качестве транспортного волокна использовалось многомодовое волокно со ступенчатым профилем преломления и сердцевинной диаметром 105 мкм (ММВ, Thorlabs AFS105/125Y), которое соединялось сваркой с отрезком бессердцевинного волокна (БСВ, Thorlabs FG125LA) длиной 50 см без акрилатной защитной оболочки.

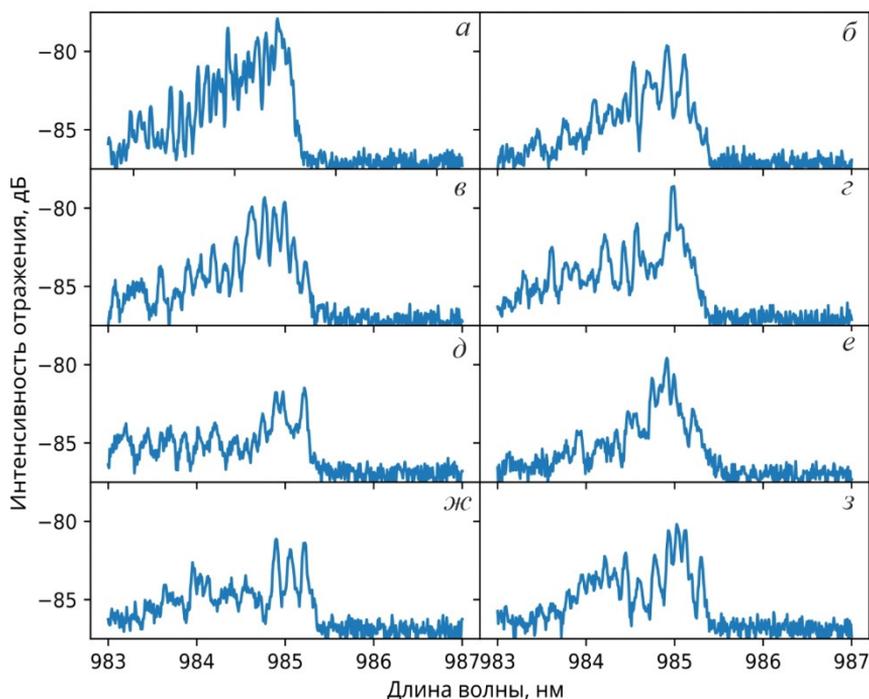


Рис. 2. Спектры отражения записанных ВБР

В эксперименте использовалась ВБР (спектр которой представлен на рис. 2, д), которая находилась на значительно большем расстоянии, чем при измерении в одномодовой схеме – около 45 см от соединения. Волокно размещалось в трубчатой печи (LF-50/500-1200 с максимальной температурой нагрева до 1200 °С) так, что ВБР находилась в центральной области трубы, где измеряется температура встроенной термопарой. Отраженное излучение через второй порт ответвителя направлялось на оптический анализатор спектра (ОСА, OceanOptics USB4000-XR1-ES) с диапазоном измерения 200 – 1100 нм и спектральным разрешением <math>< 2</math> нм при размере входной щели 25 мкм. Такая схема измерения позволяет снизить потери на соединении с бессердцевинным

волоконном и уменьшить влияние модовой интерференции за счет многомодового сбора. Минусами данного подхода являются повышенная чувствительность к изменению положения (изгибу) транспортного волокна, увеличение спектральной ширины ВБР и высокий уровень фонового излучения от нагретой печи.

Поскольку в отличие от ВБР, сформированных в одномодовых волокнах, спектр отражения многомодовых ВБР значительно более асимметричен, то для определения центральной длины волны использовалась аппроксимация кубическим полиномом спектра отражения вблизи максимума отражения ВБР, а в качестве длины волны отражения брался корень производной аппроксимационного полинома, который ближе всего к максимуму отражения ВБР. Чтобы другие возникающие в ходе эксперимента возможные максимумы интенсивности, например, вызванные температурным свечением, ложно не идентифицировались как ВБР, в алгоритм добавлено условие на максимальное изменение  $\lambda_{\text{ВБР}}$  между измерениями на  $\pm 2,3$  нм, что примерно соответствует половине ее спектральной ширины.

## **2. Результаты экспериментов**

Для проверки работоспособности такой ВБР печь сначала нагревалась до температуры 1100 °С, при которой производилась выдержка в течение 30 минут, далее – до 1150 °С с выдержкой в течение 15 минут и, наконец, до 1200 °С с выдержкой 10 минут, весь эксперимент занимал около 3 часов. В течение всего времени работы печи производилась автоматизированная запись спектров отражения ВБР в описанной выше схеме с интервалом около 30 секунд. На рис. 3, *а* представлены зависимости температуры  $T$ , длины волны отражения ВБР  $\lambda_{\text{ВБР}}$  и нормированной амплитуды отражения  $R$  от времени. Из графика для длины волны отражения ВБР  $\lambda_{\text{ВБР}}$  видно, что она с хорошей точностью повторяет изменения температуры. При этом коэффициент отражения  $R$  сначала растет до температуры  $\sim 600$  °С, а затем снижается, но при температурах выдержки 1100 и 1150 °С его флуктуация незначительна. Во время выдержки при 1200 °С амплитуда отражения уже падает монотонно со временем, а длина волны начинает флуктуировать (дополнительно спектры отражения при 1200 °С представлены на рис. 5, *б*). В момент отключения печи (175 минут) произошел скачок значений длины волны ВБР и отражения, что, по-видимому, соответствует слою волокна. Вероятно,

произошло размягчение стекла и прилипание к стенкам корундовой трубки, что при остывании привело к отрыву материала из-за разности КЛТР. Зависимость длины волны ВБР от температуры достаточно близка к линейной со средней чувствительностью около  $9 \text{ пм}/^\circ\text{C}$  (см. рис. 3, б), но более описывается уже полиномом четвертой степени

$$P(T) \approx 3 \cdot 10^{-11} \cdot T^4 - 7,3 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 5,4 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 2,24 \cdot 10^{-3} \cdot T + 983,6,$$

для которого среднеквадратическое отклонение (СКО) восстановленной температуры от установленной составляет  $33,2^\circ\text{C}$  на всем интервале. При постоянных температурах 1100, 1150 и  $1200^\circ\text{C}$  СКО значений  $\lambda_{\text{ВБР}}$  составляет 314, 124 и 167 пм соответственно, что соответствует точности восстановления температуры  $37,4$ ,  $8,4$  и  $5,4^\circ\text{C}$ . Большой разброс значения  $\lambda_{\text{ВБР}}$  при температуре  $1100^\circ\text{C}$ , вероятно, связан с процессом отжига структуры модификации показателя преломления, что приводит к изменениям параметров ВБР.

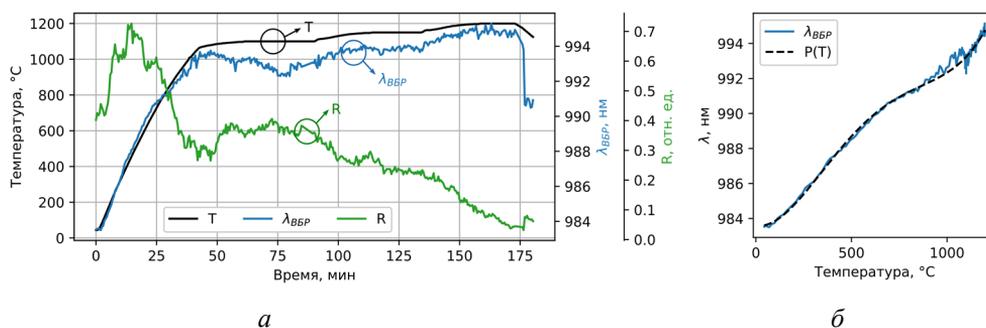


Рис. 3. Зависимости температуры  $T$ , длины волны отражения ВБР  $\lambda_{\text{ВБР}}$  и нормированной амплитуды отражения  $R$  от времени (а); зависимость длины волны от температуры и аппроксимационный полином четвертой степени  $P(T)$  (б)

Значение СКО на всем интервале достаточно велико, что практически означает сравнительно небольшую точность определения температуры около  $\pm 60^\circ\text{C}$  (5 % от интервала измерений). Это определяется стохастическими выбросами по длинам волн, связанным с несоответствием температуры в малой окрестности ВБР и термопары, также возможен вклад в ошибку алгоритмов определения центральной длины волны ВБР. Приемлемый уровень точности для практического применения определяется, конечно, конкретной задачей, но зачастую он должен быть не более  $10^\circ\text{C}$  (менее 1 % от диапазона измерений). Непрерывное измерение центральной длины волны от температуры,

показанное на рис. 3, *а*, не является правильным с точки зрения процедуры калибровки, а является, в соответствии с целями данной работы, лишь демонстрацией возможности определения температуры. Корректная процедура калибровки волоконно-оптических датчиков температуры предполагает сбор статистики показаний при нескольких значениях температуры, что одновременно дает информацию о чувствительности и точности измерений. Кроме этого не проводилась процедура предварительного отжига ВБР перед калибровкой.

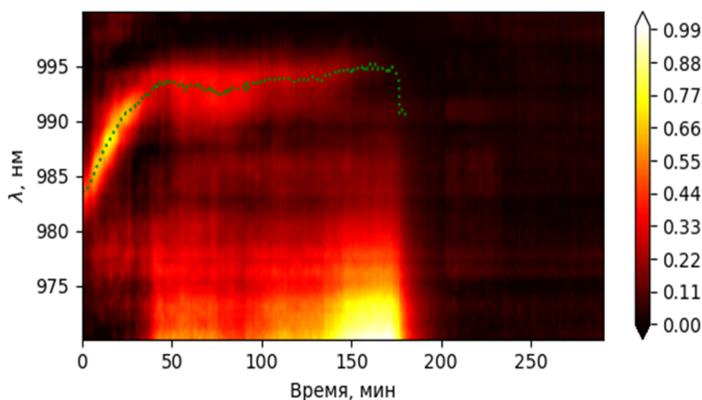


Рис. 3. Спектрограмма эксперимента и зависимость длины волны ВБР от времени

На рис. 4 представлена полная спектрограмма эксперимента, а пунктиром – длина волны ВБР  $\lambda_{ВБР}$ . Излучение в коротковолновой области, интенсивность которого растет с увеличением температуры, соответствует тепловому излучению нагретой печи и волокна.

На рис. 4, *а* приведены спектры отражения при различных температурах, а на рис. 4, *б* – динамика спектров отражения при 1200 °С.

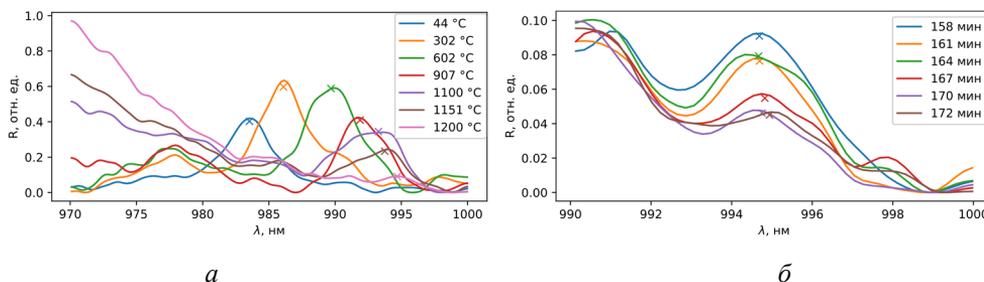


Рис. 4. Спектры отражения ВБР при различных температурах (*а*); спектры отражения ВБР при 1200 °С (*б*)

Крестики соответствуют найденной по описанному методу центральной длине волны отражения ВБР  $\lambda_{\text{ВБР}}$ . Ширина спектра ВБР при комнатной температуре составила около 4,3 нм. Видно, что от температуры ширина спектра отражения изменяется, а сам спектр ВБР имеет некоторую внутреннюю структуру.

### **Заключение**

В работе впервые экспериментально продемонстрирована возможность измерения высоких температур вплоть до 1200 °С с помощью ВБР с длиной волны отражения 985 нм и шириной на полувысоте 4,3 нм, записанной в бессердцевинном чистокварцевом волокне методом фемтосекундной поточечной записи. При этом сама ВБР находилась на расстоянии 50 см от соединения с транспортным волокном, что, как минимум, в два раза больше, чем в других работах. Средняя температурная чувствительность исследуемого образца составила около 9 пм/°С, что близко к таковой для ВБР в стандартных одномодовых волокнах типа SMF-28. Как следует из результатов эксперимента, метод может применяться для измерения температуры до 1150 °С, минимум, в течение часа, так как такая ВБР остается стабильной в воздушной атмосфере. При 1200 °С наблюдается деградация коэффициента отражения со временем, вызванная разрушением (расплавлением) структуры ВБР и стержня.

Использование полностью многомодовой схемы опроса позволило существенно повысить интенсивность отраженного света, а также снизить влияние модовой интерференции на регистрируемый спектр ВБР. Потенциально можно использовать и одномодовую схему для измерения со специальной математической обработкой спектра (гауссовское усреднение или скользящее среднее), однако у такого варианта будет значительно меньше соотношение сигнала к шуму.

Для улучшения отношения сигнала к шуму коэффициент отражения ВБР может быть повышен за счет оптимизации метода записи ВБР, увеличения ее поперечного сечения и длины. Влияние мощной температурной фоновой засветки, которая присутствует при высоких температурах, может быть существенно уменьшена, если предварительно провести температурную калибровку (компенсацию) фонового свечения, измерив зависимость спектра от температуры, а затем методом аппроксимации вычитать фон из сигнального спектра. Также необходимо минимизировать отражение излучения источника от торца за счет

угловой полировки. В дальнейшем необходимо выполнить более подробное исследование долговременной стабильности таких ВБР при температурах свыше 1000 °С, а также исследовать влияние отжига на стабильность параметров ВБР.

### **Список литературы**

1. Куницина, Н.Г. Обзор различных способов измерения температуры в металлургических процессах / Н.Г. Куницина, Н.К. Николи // Наука и производство Урала. – 2020. – Т. 16. – С. 35–37.
2. Modeling analysis and experimental study on epoxy packaged FBG sensor for cryogenic temperature measurement / Y. Ren [et al.] // Opt. Fiber Technol. – 2024. – Vol. 84. – P. 103710.
3. Fiber Bragg grating regeneration at 450 °C for improved high temperature sensing / K. Chah [et al.] // Opt. Lett. – 2019. – Vol. 44. – P. 4036–4039.
4. Regenerated fibre Bragg gratings: a critical assessment of more than 20 years of investigations / L. Polz [et al.] // Opt. Laser Technol. – 2021. – Vol. 134. – P. 106650.
5. Extreme silica optical fibre gratings / J. Canning [et al.] // Sensors. – 2008. – Vol. 8, № 10. – P. 6448–6452.
6. Development and performance verification of fiber optic temperature sensors in high temperature engine environments / G. Adamovsky [et al.] // Proceedings of 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. – 2014. – P. 1–12.
7. Long-term thermal stability tests at 1000 °C of silica fibre Bragg gratings made with ultrafast laser radiation / D. Grobncic [et al.] // Meas. Sci. Technol. – 2006. – Vol. 17, № 5. – P. 1009–1013.
8. Thermal properties of fibre Bragg gratings inscribed point-by-point by infrared femtosecond laser / A. Martinez, I.Y. Khrushchev, I. Bennion // Electron. Lett. – 2005. – Vol. 41, № 4. – P. 176–178.
9. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments / S.J. Mihailov // Sensors. – 2012. – Vol. 12. – P. 1898–1918.
10. Single-mode sapphire fiber temperature sensor / M. Wang [et al.] // J. Light. Technol. – 2024. – Vol. 42, № 18. – P. 6409–6416.
11. Исследование воздействия  $\beta$ -излучения на волоконные брэгговские решетки, записанные фемтосекундным лазерным излучением / А.В. Достовалов, В.А. Симонов, К.А. Окотруб [и др.] // Прикладная фотоника. – 2021. – Т. 8, № 2. – С. 5–18.
12. Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule / A.V. Dostovalov [et al.] // Opt. Express. – 2016. – Vol. 24, № 14. – P. 16232–16237.

13. Large-scale cascading of first-order FBG array in a highly multimode coreless fiber using femtosecond laser for distributed thermal sensing / F. Mumtaz [et al.] // *Opt. Express.* – 2023. – Vol. 31, № 18. – P. 29639.
14. Ultra-fast annealing improves SNR and long-term stability of a highly multiplexed line-by-line FBG array inscribed by femtosecond laser in a coreless fiber for extreme-temperature applications / F. Mumtaz [et al.] // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 2024. – Vol. 73. – P. 9505210.
15. Bragg grating writing through the polyimide coating of high NA optical fibres with femtosecond IR radiation / S.J. Mihailov [et al.] // *Opt. Commun.* – 2008. – Vol. 281, № 21. – P. 5344–5348.

## References

1. Kunitsina N.G., Nikoli N.K. Obzor razlichnykh sposobov izmereniia temperatury v metallurgicheskikh protsessakh [Review of various methods of temperature measurement in metallurgical processes]. *Nauka i proizvodstvo Urala*, 2020, vol. 16, pp. 35-37.
2. Ren Y. et al. Modeling analysis and experimental study on epoxy packaged FBG sensor for cryogenic temperature measurement. *Opt. Fiber Technol.*, 2024, vol. 84, p. 103710.
3. Chah K. et al. Fiber Bragg grating regeneration at 450 °C for improved high temperature sensing. *Opt. Lett.*, 2019, vol. 44, pp. 4036-4039.
4. Polz L. et al. Regenerated fibre Bragg gratings: a critical assessment of more than 20 years of investigations. *Opt. Laser Technol.*, 2021, vol. 134, p. 106650.
5. Canning J. et al. Extreme silica optical fibre gratings. *Sensors*, 2008, vol. 8, no. 10, pp. 6448-6452.
6. Adamovsky G. et al. Development and performance verification of fiber optic temperature sensors in high temperature engine environments. *Proceedings of 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2014, pp. 1-12.
7. Grobnc D. et al. Long-term thermal stability tests at 1000 °C of silica fibre Bragg gratings made with ultrafast laser radiation. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, vol. 17, no. 5, pp. 1009-1013.
8. Martinez A., Khrushchev I.Y., Bennion I. Thermal properties of fibre Bragg gratings inscribed point-by-point by infrared femtosecond laser. *Electron. Lett.*, 2005, vol. 41, no. 4, pp. 176-178.
9. Mihailov S.J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments. *Sensors*, 2012, vol. 12, pp. 1898-1918.
10. Wang M. et al. Single-mode sapphire fiber temperature sensor. *J. Light. Technol.*, 2024, vol. 42, no. 18, pp. 6409-6416.
11. Dostovalov A.V., Simonov V.A., Okotrub K.A. et al. Issledovanie vozdeistviia  $\beta$ -izlucheniia na volokonnye breggovskie reshetki, zapisannye femtosekundnym lazernym izlucheniem [Investigation of B-radiation influence on fiber Bragg

gratings inscribed by femtosecond laser radiation]. *Applied Photonics*, 2021, vol. 8, no. 2, pp. 5-18.

12. Dostovalov A.V. et al. Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule. *Opt. Express*, 2016, vol. 24, no. 14, pp. 16232-16237.

13. Mumtaz F. et al. Large-scale cascading of first-order FBG array in a highly multimode coreless fiber using femtosecond laser for distributed thermal sensing. *Opt. Express*, 2023, vol. 31, no. 18, p. 29639.

14. Mumtaz F. et al. Ultra-fast annealing improves SNR and long-term stability of a highly multiplexed line-by-line FBG array inscribed by femtosecond laser in a coreless fiber for extreme-temperature applications. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2024, vol. 73, p. 9505210.

15. Mihailov S.J. et al. Bragg grating writing through the polyimide coating of high NA optical fibres with femtosecond IR radiation. *Opt. Commun.*, 2008, vol. 281, no. 21, pp. 5344-5348.

#### **Сведения об авторе**

##### **СИМОНОВ В.А.**

e-mail: [simonovva@iae.nsk.su](mailto:simonovva@iae.nsk.su)

Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Лаборатории волоконной оптики Института автоматизации и электротехники СО РАН, г. Новосибирск.

##### **ГОЛИКОВ Е.В.**

e-mail: [golikov.inc@mail.ru](mailto:golikov.inc@mail.ru)

Инженер-программист Лаборатории волоконной оптики Института автоматизации и электротехники СО РАН, г. Новосибирск.

##### **ТЕРЕНТЬЕВ В.С.**

e-mail: [terentyev@iae.nsk.su](mailto:terentyev@iae.nsk.su)

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории волоконной оптики Института автоматизации и электротехники СО РАН, г. Новосибирск.

#### **About the author**

##### **V.A. SIMONOV**

e-mail: [simonovva@iae.nsk.su](mailto:simonovva@iae.nsk.su)

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Research Fellow, Laboratory Fiber Optics of Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk.

##### **E.V. GOLIKOV**

e-mail: [golikov.inc@mail.ru](mailto:golikov.inc@mail.ru)

Engineer-programmer, Laboratory Fiber Optics of Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk.

##### **V.S. TERYTYEV**

e-mail: [terentyev@iae.nsk.su](mailto:terentyev@iae.nsk.su)

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow, Laboratory Fiber Optics of Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk.

**ДОСТОВАЛОВ А.В.**

e-mail: *Dostovalov@iae.nsk.su*

**A.V. DOSTOVALOV**

e-mail: *Dostovalov@iae.nsk.su*

Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории волоконной оптики Института автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, старший преподаватель, физический факультет, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск.

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Leading Research Fellow, Laboratory Fiber Optics of Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Senior lecturer, Physics department, Novosibirsk State University, Novosibirsk.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках темы госзадания Института автоматизации и электрометрии СО РАН «Разработка элементов и исследование характеристик лазерных и сенсорных систем на основе структурированных волоконных световодов, микрорезонаторов и гибридных схем» (FWNG-2024-0015).

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
**Вклад авторов** равноценный.

**Получена:** 14.10.2024

**Одобрена:** 18.10.2024

**Принята к публикации:** 20.10.2024

**Financing.** The study was carried out with the support of the state budget research project “Automatic geodetic monitoring of the natural environment and engineering structures using low-budget high-precision vertical displacement sensors in the conditions of the Far North” (FEFS-2023-0003).

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

**The authors' contribution is equal.**

**Received:** 14/10/2024

**Approved:** 18/10/2024

**Accepted for publication:** 20/10/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: ВБР в бессердцевинном кварцевом волокне для измерения высоких температур / В.А. Симонов, Е.В. Голиков, В.С. Терентьев, А.В. Достовалов // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 4. – С. 35–49.

Please cite this article in English as: Simonov V.A., Golikov E.V., Terentyev V.S., Dostovalov A.V. FBG in coreless silica fiber for high temperature measurements. *Applied photonics*, 2024, vol. 11, no. 4, pp. 35–49.

УДК 681.7.068

**К.А. Овчинников**

Пермская научно-производственная приборостроительная компания,  
Пермь, Российская Федерация  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Российская Федерация

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОПТИЧЕСКУЮ СХЕМУ РЕЗОНАТОРНОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА**

Представлено исследование влияния температуры на оптическую схему резонаторного волоконно-оптического гироскопа (РВОГ), а также проведено исследование влияния температуры на полуволновое напряжение фазового модулятора, влияние на спектры и мощность суперлюминесцентного диода, на выходную амплитудно-частотную характеристику волоконно-оптического кольцевого резонатора. Результаты исследования показали, что в диапазоне температур от  $-30$  до  $+50$  °C оказывает существенное влияние на параметры оптической схемы РВОГ. Данное исследование является важным этапом разработки РВОГ, указывающее на то, какие параметры необходимо особо тщательно контролировать при дальнейшей разработке датчика для обеспечения температурной стабильности устройства.

**Ключевые слова:** оптический кольцевой резонатор, оптический гироскоп, датчик угловой скорости, суперлюминесцентный диод, полуволновое напряжение.

**K.A. Ovchinnikov**

Perm Scientific and Production Instrument-Making Company,  
Perm, Russian Federation  
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **STUDY OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE OPTICAL SCHEME OF A RESONATOR FIBER-OPTIC GYROSCOPE**

The article presents a study of the temperature effect on the optical circuit of a resonator fiber-optic gyroscope (RFOG), as well as a study of the temperature effect on the half-wave voltage of the phase modulator, the effect on the spectra and power of the superluminescent diode, and the output amplitude-frequency characteristic of the fiber-optic ring resonator. The results of the study showed that in the temperature range from  $-30$  to  $+50$  °C has a significant effect on the parameters of the optical circuit of the RFOG. This study is an important stage in the development of the RFOG, indicating which parameters must be especially carefully monitored during further development of the sensor to ensure the temperature stability of the device.

**Keywords:** optical ring resonator, optical gyroscope, angular velocity sensor, superluminescent diode, half-wave voltage.

## **Введение**

Миниатюризация является важной задачей в современной науке и технике, которая также находит развитие в области волоконно-оптических датчиков. Уменьшение размеров датчиков позволяет расширять сферы их применения и решать сложные задачи, не доступные ранее. В области волоконно-оптической гироскопии перспективным кандидатом для решения задачи миниатюризации являются волоконно-оптические резонаторы [1], позволяющие уменьшить габариты чувствительного элемента за счет многократного прохождения оптического пути внутри замкнутой полости резонатора [2–5].

Последнее время все больше исследований касаются новой схемы резонаторных волоконно-оптических гироскопов, работающих на широкополосном излучении, которое позволяет снизить влияние шумов обратно рассеянного излучения и повысить стабильность работы резонаторных гироскопов [6–9].

Проведено экспериментальное исследование влияния температуры окружающей среды в диапазоне от  $-30$  до  $+50$  °С на оптическую схему резонаторного волоконно-оптического гироскопа с длиной резонансного контура 50 м и с суперлюминесцентным диодом с центральной длиной волны 1550 нм в качестве источника излучения. Исследование температурного влияния на оптическую схему в целом и на отдельные ее составляющие является важным этапом при разработке устройств, поскольку помогает определить критические параметры для обеспечения температурной стабильности итогового устройства.

### **Описание резонаторного волоконно-оптического гироскопа**

Волоконно-оптический кольцевой резонатор (ВОКР), применяемый в РВОГ, образован двумя волоконно-оптическими делителями, в которых возникает слабая связь, и волоконного контура, который вместе с делителями образует замкнутую полость резонатора. За счет многократного прохождения оптического пути по замкнутой траектории излучение в таком устройстве значительно увеличивает влияние эффекта Саньяка, тем самым обеспечивая высокую чувствительность даже при малых длинах контура. На рис. 1 представлена схема исследуемого резонаторного волоконно-оптического гироскопа.

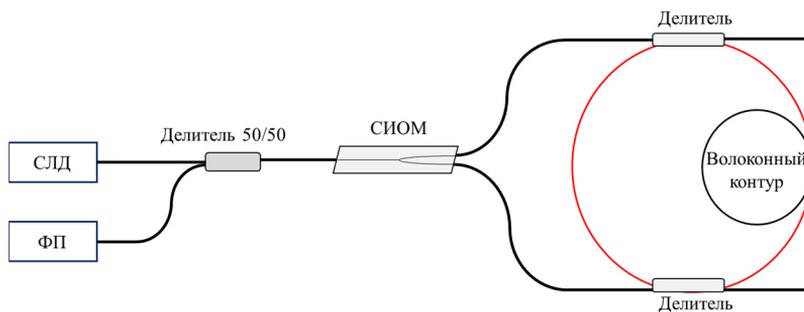


Рис. 1. Схема резонаторно-интерферометрического волоконно-оптического гироскопа

Здесь источником излучения служит суперлюминесцентный диод (СЛД). Свет от источника, проходя через делитель 50/50, попадает на многофункциональную интегрально-оптическую схему (СИОМ), которая выступает в качестве поляризатора, делителя и фазового модулятора. В СИОМ излучение разделяется по двум каналам, каждый из которых связан с ВОКР. После попадания в ВОКР оба излучения движутся во взаимно противоположных направлениях: в направлении по часовой (CW) и против часовой стрелки (CCW). После прохождения ВОКР оба излучения возвращаются к СИОМ, где каждое излучение испытывает дополнительное частотное смещение, вызванное модуляцией, и затем оба излучения интерферируют. Результирующее излучение, проходя через делитель 50/50, попадает на фотодиод.

Основными элементами данной схемы являются СЛД, СИОМ, ВОКР. Наиболее критичными параметрами для работы схемы являются: полуволновое напряжение СИОМ, мощность и центральная дина волны СЛД, амплитудно-частотная характеристика ВОКР и выходная оптическая мощность всей схемы. В данной работе рассмотрены изменения этих параметров в диапазоне температур от  $-30$  до  $+50$  °С.

В работе исследовалась схема РВОГ с длиной ВОКР, равной 50 м, и коэффициентом деления 80/20. Параметры ВОКР при комнатной температуре составили (таблица).

Параметры ВОКР при комнатной температуре

Параметры	Значение
FSR, МГц	4,10
FWHM, кГц	430,34
Finesse	9,53

Центральная длина волны исследуемого СЛД при комнатной температуре составляет 1555 нм, ширина спектра составляет 40 нм.

### Результаты исследований

В ходе эксперимента схема РВОГ помещалась в термокамеру, в которой задавалась постоянная температура в диапазоне от  $-30$  до  $+50$  °С с шагом в 10 °С. При установлении постоянной температуры измерялись исследуемые параметры СЛД, СИОМ, ВОКР. На рис. 2 представлена амплитудно-частотная характеристика ВОКР при разных значениях температур.

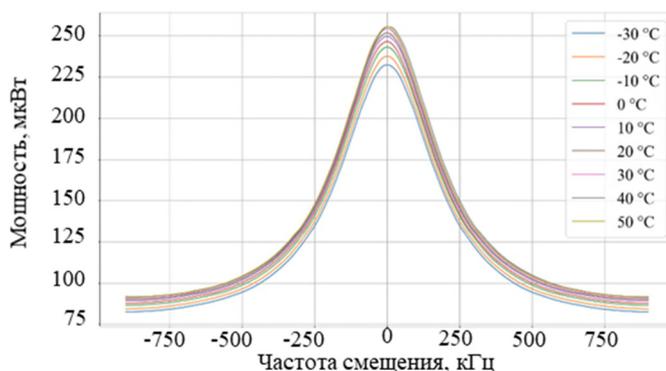


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика ВОКР

Анализ данных показывает, что изменение параметров FSR, FWHM, Finesse составляет не более 5 % в указанном диапазоне температур. При этом уровень выходной мощности при постоянном уровне входной мощности, представленный на рис. 3, изменяется в пределах 10 %, что согласуется с ранее проведенным исследованием [10].

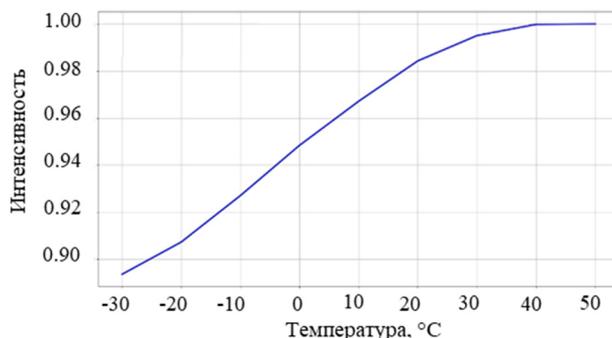


Рис. 3. Отклонение интенсивности выходного сигнала

Исследование изменения полуволнового напряжения СИОМ показывает сильную линейную зависимость от температуры. На рис. 4 показано изменение полуволнового напряжения СИОМ. Температурный коэффициент полуволнового напряжения составил  $-5,3 \cdot 10^{-4}$  К. Данная зависимость согласуется с работами [11–14].

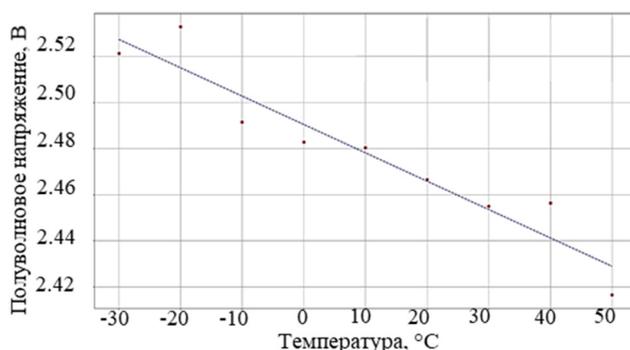


Рис. 4. Изменение полуволнового напряжения фазового модулятора

Измерение спектра СЛД при различных значениях температуры (рис. 5) показывает сильное изменение центральной длины волны, что отражается на чувствительности гироскопа, ширине спектра, а также выходной оптической мощности.

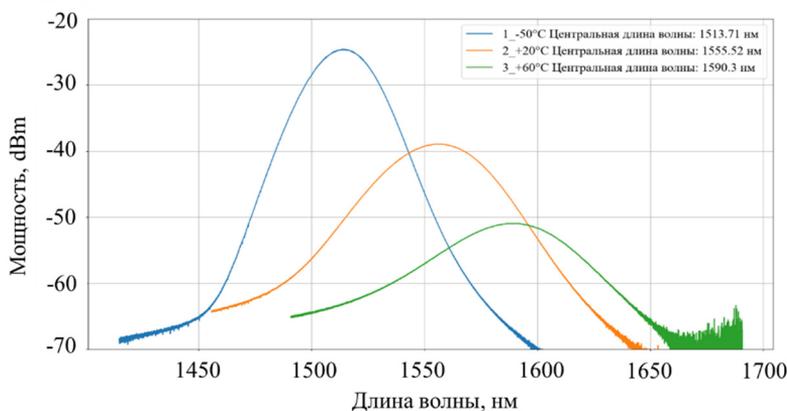


Рис. 5. Спектры СЛД при различных значениях температур

Изменение центральной длины волны демонстрирует линейную зависимость с коэффициентом  $0,7$  нм/°C. Ширина спектра изменяется более чем в 2 раза. Выходная мощность при равных значениях тока накачки меняется более чем в 10 раз.

## **Результаты и обсуждение**

Анализ экспериментальных данных показывает, что при разработке такого рода датчиков для повышения стабильности необходимо учитывать и компенсировать влияние таких параметров, как: изменения общих потерь оптической схемы, центральной длины волны источника излучения, полуволнового напряжения применяемого фазового модулятора и изменение входной мощности суперлюминесцентного диода при различных температурах. Наибольшее внимание следует уделять контролю мощности и центральной длины волны СЛД, а также компенсации изменения полуволнового напряжения.

## **Список литературы**

1. Fiber optic resonators for angular rate sensors / D.G. Gilev, K.A. Ovchinnikov, V.V. Krishtop [et al.] // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* – 2022. – Vol. 86. – P. S75–S80.
2. Broadband source-driven resonant micro-optic gyroscope based on a multi-turn waveguide-type ring resonator / Shuang Liu, Junyi Hu, Yuxin Wang, Qingwen Liu, Huilian Ma, Zuyuan He // *Opt. Lett.* – 2023. – Vol. 48. – P. 1152–1155.
3. Navigation-grade three-axis resonant fiber-optic gyroscope employing a multiplexed source / Shuang Liu, Junyi Hu, Yuxin Wang, Qingwen Liu, Huilian Ma, Zuyuan He // *Opt. Lett.* – 2023. – Vol. 48. – P. 2639–2642.
4. Resonant fiber optic gyroscope driven by a broadband light source based on an over-coupled state fiber ring resonator / Kai Xu, Yanru Zhou, Fanyan Xue, Yulin Wang, Wenyao Liu, Jun Tang, Jun Liu // *Appl. Opt.* – 2024. – Vol. 63. – P. 4840–4847.
5. Lefevre, H. *The Fiber-Optic Gyroscope. Third Edition* / H. Lefevre. – Artech, 2022.
6. Navigation-grade resonant fiber-optic gyroscope using ultra-simple white-light multibeam interferometry / Shuangxiang Zhao, Qingwen Liu, Yuanyuan Liu, Huilian Ma, Zuyuan He // *Photon. Res.* – 2022. – Vol. 10. – P. 542–549.
7. A prototype for a passive resonant interferometric fiber optic gyroscope with a  $3 \times 3$  directional coupler / K.A. Ovchinnikov, D.G. Gilev, V.V. Krishtop [et al.] // *Sensors.* – 2023. – Vol. 23, № 3. – P. 1319.
8. Performance improvement of white-light-driven resonant fiber optic gyroscope using four-frequency sawtooth wave modulation technology / F. Wu, J. Li, S. Lan, B. Yan, J. Zhou, Y. Yue // *Optics Communications.* – 2023. – Vol. 550. – P. 129827.
9. Research progress of the resonant fiber optic gyroscope technology / L. Wang, Y. Yan, H. Ma, Z. Jin // *Proceedings of Applied Optics and Photonics China.* – 2015. – P. 967906.

10. Ovchinnikov, K.A. Study of the temperature stability of the parameters of a fiber-optic resonator with preservation of polarization / K.A. Ovchinnikov, D.G. Gilev, V.V. Krishtop // Proceedings of International Conference Laser Optics (ICLO). – 2024. – P. 561.

11. Овчинников, К.А. Определение температурного коэффициента изменения полуволнового напряжения фазового модулятора на LiNbO<sub>3</sub> / К.А. Овчинников, Д.Г. Гилев, В.В. Криштоп // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 2. – С. 36–48.

12. Hui, R. Chapter 7: External electro-optic modulators. Introduction to Fiber-Optic Communications / ed. R. Hui. – Academic Press. – 2020. – P. 299–335.

13. Smith, D.S. Refractive indices of lithium niobate / D.S. Smith, H.D. Riccius, R.P. Edwin // Optics Communications. – 1976. – Vol. 17, № 3. – P. 332–335.

14. Zook, J.D. Temperature dependence and model of the electro-optic effect in LiNbO<sub>3</sub> / J.D. Zook, D. Chen, G.N. Otto // Applied Physics Letters. – 1967. – Vol. 11, № 5. – P. 159–161.

## References

1. Gilev D.G., Ovchinnikov K.A., Krishtop V.V. et al. Fiber optic resonators for angular rate sensors. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2022, vol. 86, pp. S75-S80.

2. Liu Shuang, Hu Junyi, Wang Yuxin, Liu Qingwen, Ma Huilian, He Zuyuan Broadband source-driven resonant micro-optic gyroscope based on a multi-turn waveguide-type ring resonator. *Opt. Lett.*, 2023, vol. 48, pp. 1152-1155.

3. Liu Shuang, Hu Junyi, Wang Yuxin, Liu Qingwen, Ma Huilian, He Zuyuan Navigation-grade three-axis resonant fiber-optic gyroscope employing a multiplexed source. *Opt. Lett.*, 2023, vol. 48, pp. 2639-2642.

4. Xu Kai, Zhou Yanru, Xue Fanyan, Wang Yulin, Liu Wenyaoyao, Tang Jun, Liu Jun Resonant fiber optic gyroscope driven by a broadband light source based on an over-coupled state fiber ring resonator. *Appl. Opt.*, 2024, vol. 63, pp. 4840-4847.

5. Lefevre H. The Fiber-Optic Gyroscope. Third Edition. Artech, 2022.

6. Zhao Shuangxiang, Liu Qingwen, Liu Yuanyuan, Ma Huilian, He Zuyuan Navigation-grade resonant fiber-optic gyroscope using ultra-simple white-light multibeam interferometry. *Photon. Res.*, 2022, vol. 10, pp. 542-549.

7. Ovchinnikov K.A., Gilev D.G., Krishtop V.V. et al. A prototype for a passive resonant interferometric fiber optic gyroscope with a 3 × 3 directional coupler. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 3, p. 1319.

8. Wu F., Li J., Lan S., Yan B., Zhou J., Yue Y. Performance improvement of white-light-driven resonant fiber optic gyroscope using four-frequency sawtooth wave modulation technology. *Optics Communications*, 2023, vol. 550, p. 129827.

9. Wang L., Yan Y., Ma H., Jin Z. Research progress of the resonant fiber optic gyroscope technology. *Proceedings of Applied Optics and Photonics China*, 2015, p. 967906.

10. Ovchinnikov K.A., Gilev D.G., Krishtop V.V. Study of the temperature stability of the parameters of a fiber-optic resonator with preservation of polarization. *International Conference Laser Optics (ICLO)*, 2024, p. 561.

11. Ovchinnikov K.A., Gilev D.G., Krishtop V.V. Opredelenie temperaturnogo koeffitsienta izmeneniia poluvolnovogo napriazheniia fazovogo moduliatora na LiNbO<sub>3</sub> [Determination of temperature coefficient of change half-wave voltage phase modulator on LiNbO<sub>3</sub>]. *Applied Photonics*, 2024, vol. 11, no. 2, pp. 36-48.

12. Hui R. Chapter 7: External electro-optic modulators. Introduction to Fiber-Optic Communications. Ed. R. Hui. Academic Press, 2020, pp. 299-335.

13. Smith D.S., Riccius H.D., Edwin R.P. Refractive indices of lithium niobate. *Optics Communications*, 1976, vol. 17, no. 3, pp. 332-335.

14. Zook J.D., Chen D., Otto G.N. Temperature dependence and model of the electro-optic effect in LiNbO<sub>3</sub>. *Applied Physics Letters*, 1967, vol. 11, no. 5, pp. 159-161.

#### Сведения об авторах

#### About the authors

**ОВЧИННИКОВ К.А.**

e-mail: [krishtop@pnppk.ru](mailto:krishtop@pnppk.ru)

**OVCHINNIKOV K.A.**

e-mail: [krishtop@pnppk.ru](mailto:krishtop@pnppk.ru)

Аспирант кафедры «Общая физика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь.

Postgraduate student of the Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University, Perm

**Финансирование.** Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0006).

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

**Вклад авторов** равноценный.

**Получена:** 15.10.2024

**Одобрена:** 20.10.2024

**Принята к публикации:** 23.10.2024

**Funding.** The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSNM-2023-0006).

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

**The contribution of the authors** is equal.

**Received:** 15/10/2024

**Approved:** 20/10/2024

**Accepted for publication:** 23/10/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Овчинников, К.А. Исследование влияния температуры на оптическую схему резонаторного волоконно-оптического гироскопа / К.А. Овчинников // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 4. – С. 50–58.

Please cite this article in English as: Ovchinnikov K.A. Study of the influence of temperature on the optical scheme of a resonator fiber-optic gyroscope *Applied photonics*, 2024, vol. 11, no. 4, pp. 50-58.

# УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА (APPLIED PHOTONICS)»

---

## 1. Общие положения

- 1.1. Журнал «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» является рецензируемым периодическим научным изданием с открытым доступом. За публикацию статей плата с авторов не взимается. Все публикуемые статьи проходят обязательное рецензирование членами редколлегии и (или) независимыми внешними экспертами.
- 1.2. Учредитель и издатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ), Пермь, Россия.  
Журнал основан в 2014 году.  
С 2014 года журнал издается под названием «Прикладная фотоника (Applied Photonics)».  
Полное официальное название: Прикладная фотоника (Applied Photonics)  
Краткое название на русском языке: Прикладная фотоника  
Название журнала на английском языке: Applied Photonics  
Аббревиатура журнала на английском языке (согласно ISO-4): Appl. Ph.
- 1.3. Редакция журнала «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» при осуществлении своей деятельности опирается на Закон Российской Федерации от 27 декабря 1991 г. № 2124-1 «О средствах массовой информации», Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» от 29 декабря 2012 № 273-ФЗ, Устав Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Устав редакции журнала «Прикладная фотоника (Applied Photonics)», Политику научного журнала «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» в части соблюдения этических норм при опубликовании статей.
- 1.4. Журнал «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), свидетельство ПИ № ФС77-59184 от 03 сентября 2014 г., ISSN (Print): 2411-4367 ISSN (Online): 2411-4375.
- 1.5. Язык публикации: русский, английский.
- 1.6. Периодичность выхода: 4 раза в год.
- 1.7. Территория распространения: Российская Федерация.
- 1.8. Редакция журнала «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» кроме печатного издания организует формирование полнотекстовых электронных версий статей, доступных на сайте Журнала и научной электронной библиотеке eLibray.ru.
- 1.9. Интернет адрес сайта Журнала: <http://applied.photonics.pstu.ru>

## 2. Аудитория

- 1.10. Журнал «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» адресован научным сотрудникам, инженерам, системным программистам, руководителям промышленных предприятий и научно-исследовательских организаций, аспирантам, соискателям учёных степеней, преподавателям и студентам старших курсов технических вузов и классических университетов.
- 1.11. Подписной индекс журнала «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» в каталоге «Пресса России»: 43042.
- 1.12. Контент доступен по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial» («Атрибуция — Некоммерческое использование») 4.0 Всемирная. (CC BY-NC 4.0). Редакция журнала разрешает читателям читать, скачивать, копировать, распространять, распечатывать, искать или давать ссылки на полные тексты своих статей и позволяет читателям использовать их в любых других законных целях в соответствии с определением открытого доступа, данным Будапештской инициативой открытого доступа.

## 3. Представление материалов и их рассмотрение

- 1.13. Приём статей осуществляется через обращение по электронной почте: [photonics.appl.jrn@gmail.com](mailto:photonics.appl.jrn@gmail.com). Для этого автору необходимо подать статью, и прикрепив все необходимые материалы (п. 3.2).  
Представленные в редакцию материалы первоначально рассматриваются на предмет выполнения требований соответствия пакета предоставленных документов (см. п. 3.2)
- 1.14. В редакцию Журнала должны быть представлены:
  - 1.14.1. Текст статьи, оформленный согласно требованиям, с которыми можно ознакомиться, скачав шаблон оформления статей, доступный по ссылке <http://applied.photonics.pstu.ru/toauthors/>
  - 1.14.2. Акт экспертизы о возможности публикации статьи в открытой печати.
- 1.15. Материалы, удовлетворяющие требованиям соответствия пакета предоставленных документов и требованиям к оформлению, передаются для рецензирования.
- 1.16. К рецензированию привлекаются учёные, имеющие признанный авторитет и работающие в области знаний, к которой относится содержание рукописи.
- 1.17. Рецензенты обязаны следовать принятой Политике научного журнала «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» в части соблюдения этических норм при опубликовании статей, с которой можно ознакомиться по ссылке: <http://applied.photonics.pstu.ru/polit/>
- 1.18. Рецензия составляется по стандартной предлагаемой редакцией форме.
- 1.19. Авторы извещаются о результатах независимого рецензирования.

## 4. Редакция журнала

- 1.20. Состав редакции:  
Главный редактор: Семенов Сергей Львович;  
Заместители главного редактора: Первадчук Владимир Павлович;  
Заведующий редакцией: Алексеев Александр Олегович;

Ответственный секретарь: Владимирова Дарья Борисовна;  
Выпускающий редактор: Афанасьева Марьяна Николаевна;  
Верстальщики: Богданова Ксения Николаевна, Акчурина Юлия Шарифовна,  
Кирышева Александра Николаевна;  
Председатель комиссии по экспертизе выпуска: Белозеров Владимир Анатольевич;  
Секретарь комиссии по экспертизе выпуска: Краснянская Татьяна Ивановна.

1.21. Контакты редакции:

Адрес: Редакция журнала «Прикладная фотоника», Россия, Пермь, 614990,  
Комсомольский пр-кт, 29;  
Телефон: +7 (342) 219-81-91; +7 (342) 219-85-87;  
Эл. почта: photonics.appl.jrn@gmail.com

## **5. Графическое оформление журнала**

- 1.22. На лицевой стороне обложки расположены название журнала Прикладная фотоника, а также миниатюра с одним из ученых, прославивших свое имя в области фотоники. Обложка выполнена в бело-зеленых тонах.  
Автор концепции обложки журнала Прикладная фотоника: Первадчук Владимир Павлович.

Научное издание

# ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА

---

---

## APPLIED PHOTONICS

Т. 11, № 4

---

Выход в свет 26.12.2024. Формат 70×100/16.

Усл. печ. л. 7,15. Тираж 23 экз. Заказ № 228.

Свободная цена

---

Издательство Пермского национального  
исследовательского политехнического университета.  
Адрес: 614990, Пермский край, г. Пермь, пр-кт Комсомольский, 29.

Отпечатано в типографии Издательства  
Пермского национального исследовательского  
политехнического университета.  
Адрес: 614990, г. Пермь, пр-кт Комсомольский, 29.