

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 535.015

СПОНТАННОЕ НАРУШЕНИЕ СИММЕТРИИ В СТЕКЛЯННЫХ МИКРОСФЕРАХ С КУБИЧНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ И РЭЛЕЕВСКИМ РАССЕЯНИЕМ

© Е. А. Анашкина, А. В. Андрианов

*Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грекова РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
E-mail: elena.anashkina@ipfran.ru*

Экспериментально и теоретически исследовано спонтанное нарушение симметрии в стеклянных диэлектрических микросферах с керровской нелинейностью с учётом линейного рэлеевского рассеяния между встречными волнами при двунаправленной симметричной оптической накачке. Показано, что чем больше коэффициент рэлеевского рассеяния, тем выше пороговая мощность, необходимая для наблюдения эффекта. Увеличение рэлеевского коэффициента связи между противоположно распространяющимися волнами приводит к сужению области отстройки частоты накачки от частоты точного резонанса, в которой реализуется спонтанное нарушение симметрии, и уменьшению асимметрии состояний света.

Ключевые слова: оптический микрорезонатор, спонтанное нарушение симметрии, кубичная нелинейность, рэлеевское рассеяние.

DOI: 10.15372/AUT20250108

EDN: DKRJXX

Введение. Спонтанное нарушение симметрии — концепция фундаментальной значимости, известная во многих областях физики, таких как физика элементарных частиц, физика твёрдого тела, оптика и др. [1, 2]. В последние годы наблюдается возрастающий интерес к исследованию задач, связанных со спонтанным нарушением симметрии, а также с киральным и невзаимным распространением света в нелинейных оптических микрорезонаторах [3–5]. Микрорезонаторы с кубичной керровской нелинейностью со встречно распространяющимися волнами являются очень удобной платформой для исследования этих фундаментальных явлений. Они демонстрируют огромный потенциал для многочисленных приложений, таких как немагнитные оптические изоляторы и циркуляторы, высокочувствительные сенсоры и многие другие. Их теоретическое описание базируется на модели, в рамках которой в начале 80-х гг. было теоретически предсказано спонтанное нарушение симметрии в интерферометре с керровской средой при двунаправленной накачке [6], а именно: в системе, описываемой уравнениями на амплитуды электрических полей A_1 , A_2 , которые симметричны относительно замены $A_1 \leftrightarrow A_2$, при достижении пороговых мощностей возможно спонтанное возникновение пары устойчивых несимметричных решений, при этом симметричное решение теряет устойчивость. Этот эффект объясняется тем, что керровская нелинейность действует неодинаково на волны, распространяющиеся в противоположных направлениях: кросс-модуляция вдвое сильнее фазовой самомодуляции [3, 6]. В недавних экспериментальных и теоретических работах было показано, что в микрорезонаторах с кубичной нелинейностью, помимо спонтанного нарушения симметрии, возможна более сложная нелинейная динамика: возникновение автоколебаний, хаотических колебаний с переключением между состояниями двух волн и других только

благодаря керровской нелинейности (без учёта других типов нелинейностей и рэлеевского рассеяния) [4, 5]. Зачастую в микрорезонаторах есть линейная когерентная связь за счёт рэлеевского рассеяния между волнами, распространяющимися в противоположные стороны на одной частоте [7]. Однако, насколько нам известно, влияние рэлеевского рассеяния на формирование состояний света с нарушенной симметрией в оптических микрорезонаторах ранее детально не исследовалось.

Целью представленной работы является экспериментальное и теоретическое исследование спонтанного нарушения симметрии в стеклянных диэлектрических микрорезонаторах с кубической керровской нелинейностью с учётом линейного рэлеевского рассеяния между встречными волнами при двунаправленной симметричной оптической накачке. Научная значимость исследования заключается в том, что теоретически и экспериментально установлено сильное влияние рэлеевского рассеяния на нелинейное поведение такой системы. С практической точки зрения обнаруженный эффект необходимо учитывать при разработке невзаимных оптических элементов, использующих спонтанное нарушение симметрии встречно распространяющихся волн в оптических микрорезонаторах.

Эксперимент. Для экспериментального исследования спонтанного нарушения симметрии в оптическом микрорезонаторе собрана лабораторная система, упрощённая схема которой приведена на рис. 1, *a*. В качестве микрорезонатора использовалась стеклянная диэлектрическая микросфера, изготовленная из стандартного телекоммуникационного волокна с применением технологии, подробное описание которой дано в [8]. Для двухсторонней накачки микросферы использовался частотно-перестраиваемый узкополосный лазер (Santec TSL-770), излучение которого делилось точно поровну на два канала и через волоконную перетяжку диаметром $\sim 1,5$ мкм заводилось в микросферу в противоположных направлениях. Длины волокон в канале 1 (K1) и канале 2 (K2) были прецизионно выровнены. Волоконные перетяжки изготавливались из волокна путём нагрева и растяжения [8–10]. Преобразованное в микросфере излучение выводилось через вторую волоконную перетяжку и измерялось с помощью двух одинаковых откалиброванных фотодетекторов и осциллографа (Tektronix MSO-64 6-BW-8000). Микрофотография микросферы и двух волоконных перетяжек показана на рис. 1, *b*, микрофотография микросферы в перпендикулярной плоскости приведена на рис. 1, *c*. Для контроля зазоров между микросферой и волоконными перетяжками с точностью 50 нм использовались трёхкоординатные пьезоэлектрические микроподвижки. Кроме того, с помощью анализатора спектра можно контролировать, чтобы в микрорезонаторе не происходила нелинейно-оптическая генерация новых частот. Установленная частота лазера менялась по пилообразному закону с частотой 60 ГГц/с и амплитудой 10 ГГц. Известно, что в микросфере могут возбуждаться различные семей-

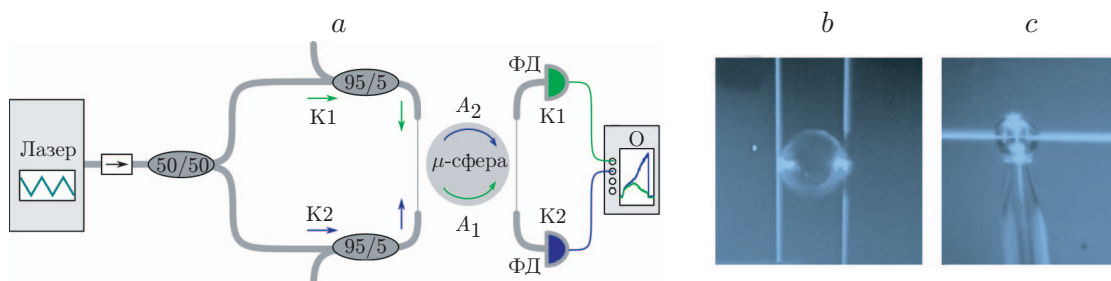


Рис. 1. Упрощённая схема экспериментальной установки (*a*): ФД — фотодиод; О — осциллограф; μ -сфера — микросфера; A_1 , A_2 — комплексные амплитуды противоположно распространяющихся волн. Микрофотография микросферы и волоконных перетяжек в двух перпендикулярных плоскостях (*b*, *c*)

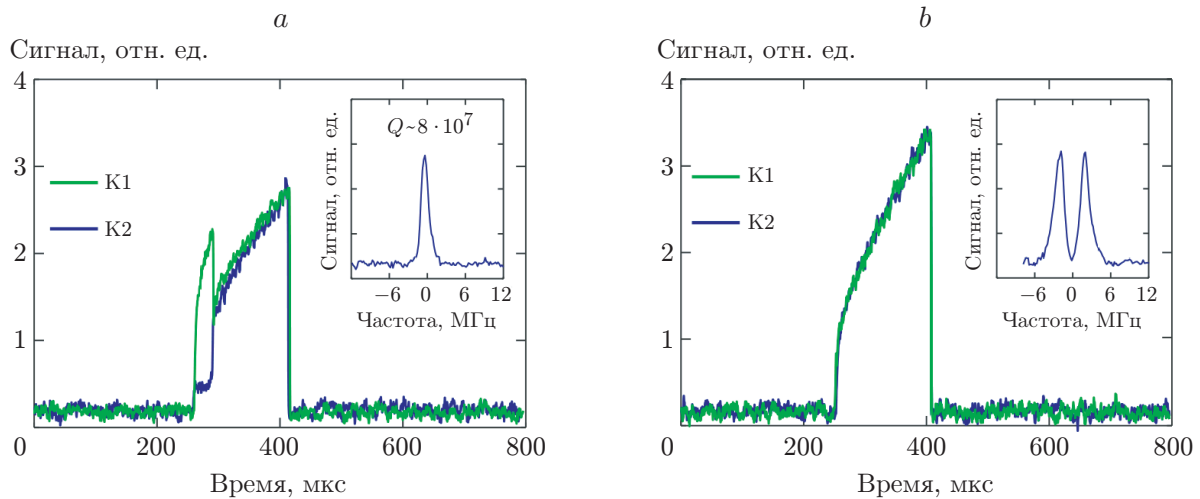


Рис. 2. Экспериментально измеренные сигналы в каналах K1 и K2 в схеме на рис. 1, а в случаях слабого ($\beta \sim 0,4$) (а) и сильного рэлеевских рассеяний ($\beta \sim 3$) (b) при мощностях накачки в каждом канале 4 мВт ($X \sim 4$). На вставках показаны соответствующие линейные резонансы, измеренные при односторонней накачке мощностью $< 0,1$ мВт

ства собственных мод. Положение волоконных перетяжек можно настроить относительно микросферы таким образом, чтобы гарантированно работать как с резонансом, для которого рэлеевское рассеяние мало (вставка на рис. 2, а, измеренная в линейном режиме при односторонней накачке малой мощности $< 0,1$ мВт), так и с резонансом, для которого рэлеевское рассеяние большое, и резонанс становится сильно расщеплённым (вставка на рис. 2, b, также измеренная при мощности $< 0,1$ мВт) [11]. Отметим, что на коэффициент рэлеевского рассеяния сильно влияет положение рассеивателя (небольшого дефекта) относительно пространственного распределения моды. Например, если рассеиватель находится вблизи локального минимума амплитуды, то коэффициент рассеяния будет значительно меньше, чем в случае, когда рассеиватель находится вблизи максимума. Мы не могли измерять пространственную структуру рабочей моды и влиять на положение дефектов, но могли экспериментально выбрать разные реализации.

Проведены измерения нелинейных резонансов при мощности накачек ~ 4 мВт в каждом канале для собственных мод со слабым и сильным рэлеевским рассеянием. На рис. 2, а показаны результаты измерений при слабом рэлеевском рассеянии. Видно, что при времени ~ 250 мкс имеется участок со спонтанно нарушенной симметрией — сигнал в канале K1 становится значительно выше, чем сигнал в канале K2, а затем симметрия в системе полностью восстанавливается. Для резонанса с сильной рэлеевской связью не наблюдается нарушение симметрии, сигналы одинаковы в обоих каналах (см. рис. 2, b). Отметим, что даже с увеличением мощности накачки до 7,5 мВт в каждом канале в случае сильно расщеплённого резонанса спонтанное нарушение симметрии не происходило.

Численное моделирование. Выполнено теоретическое исследование для объяснения наблюдаемых в эксперименте эффектов — спонтанного нарушения симметрии при слабом рэлеевском рассеянии и реализации полностью симметричных состояний при сильном рассеянии. Рассмотрено распространение в противоположные стороны двух волн с комплексными амплитудами A_1 и A_2 в микрорезонаторе с керровской нелинейностью с добавлением линейной связи за счёт рэлеевского рассеяния [7, 11, 12] при двухсторонней накачке с одинаковыми мощностями и фазами в обоих каналах. Предлагаемая система

может быть описана динамическими уравнениями в безразмерном виде:

$$\frac{dA_1}{dt} = -A_1 - i\Delta A_1 + i|A_1|^2 A_1 + 2i|A_2|^2 A_1 + i\beta A_2 + X^{1/2}, \quad (1)$$

$$\frac{dA_2}{dt} = -A_2 - i\Delta A_2 + i|A_2|^2 A_2 + 2i|A_1|^2 A_2 + i\beta A_1 + X^{1/2}, \quad (2)$$

где t — медленное время, слагаемые $-A_{1,2}$ описывают потери, Δ — отстройка накачки от точного резонанса, слагаемые $i|A_{1,2}|^2 A_{1,2}$ и $2i|A_{2,1}|^2 A_{1,2}$ отвечают за керровскую фазовую самомодуляцию и кросс-модуляцию соответственно, β — коэффициент рэлеевской связи, X — мощность накачки. Отметим, что аналогичные безразмерные уравнения для описания нелинейной динамики системы, отличающейся от нашей только отсутствием рэлеевского рассеяния, использовались в [4, 5]. Подробный вывод уравнений для описания нелинейной динамики похожей системы (с учётом керровской нелинейности и рэлеевского рассеяния, а также с возможностью описания импульсных режимов), но при однонаправленной накачке дан в [12]. Этот вывод достаточно громоздкий, поэтому здесь не приводится, но легко может быть воспроизведён и для двухсторонней накачки.

Определим все стационарные состояния системы (1)–(2) при различных параметрах. Для этого при $d/dt = 0$ сведём уравнения (1)–(2) к системе нелинейных алгебраических уравнений относительно $|A_1|^2$ и $|A_2|^2$ и численно найдём все пары корней. Хорошо известно, что в отсутствие линейной когерентной связи между противоположно распространяющимися волнами (т. е. при $\beta = 0$), когда мощность накачки превышает пороговое значение $X_{Thr0} = 8/(3 \times 3^{1/2}) \approx 1,54$, в системе наблюдается спонтанное нарушение симметрии [3, 6]. При определённом значении отстройки происходит бифуркация типа «вилка»: симметричное решение с $|A_1|^2 = |A_2|^2$ теряет устойчивость, и возникает пара асимметричных устойчивых решений [3, 6]. Это явление обусловлено тем, что керровская фазовая кросс-модуляция в два раза сильнее, чем самомодуляция [3, 6]. Определим пороговое значение мощности накачки X_{Thr} , при котором происходит спонтанное нарушение симметрии, как функцию рэлеевского коэффициента β . Соответствующая зависимость $X_{Thr}(\beta)$ представлена на рис. 3, а. Чем больше коэффициент связи, тем выше пороговая мощность. На рис. 3, б, в показаны нелинейные резонансы при $\beta = 0,2$ и $\beta = 0,4$ соответственно как функции отстройки Δ . Устойчивые ветви отмечены сплошными кривыми, а неустойчивые — пунктирными. Для иллюстрации обоих случаев выбраны значения мощности $X = 1, 3, 4$. Значение $X = 1$ находится ниже порога; в системе реализуются только симметричные решения. Значение $X = 3$ превышает порог для $\beta = 0,2$, но ниже порога для $\beta = 0,4$. Поэтому соответствующие зависимости мощностей волн $|A_1|^2$ и $|A_2|^2$ имеют участки с нарушенной симметрией на рис. 3, б и полностью симметричны на рис. 3, в. Значение $X = 4$ превышает порог для обоих рассмотренных коэффициентов $\beta = 0,2$ и $\beta = 0,4$, следовательно, для данной мощности накачки наблюдается спонтанное нарушение симметрии на рис. 3, б, в.

Нами также независимо численно интегрирована динамическая система (1)–(2) при разных значениях отстройки Δ на достаточно длительных интервалах времени, в результате чего система приходила к устойчивому состоянию равновесия для каждого конкретного Δ при выбранных значениях мощности. Рассмотрение более сложной нелинейной динамики, которая может возникать в системе при дальнейшем росте накачки, выходит за рамки данной работы. Чтобы эмулировать эксперимент, мы плавно увеличивали Δ для каждого последующего запуска, и в качестве начальных условий устанавливали A_1 и A_2 для предыдущего значения отстройки. Для первого запуска при минимальной отстройке устанавливались случайные малые начальные значения A_1 и A_2 . Соответствующие

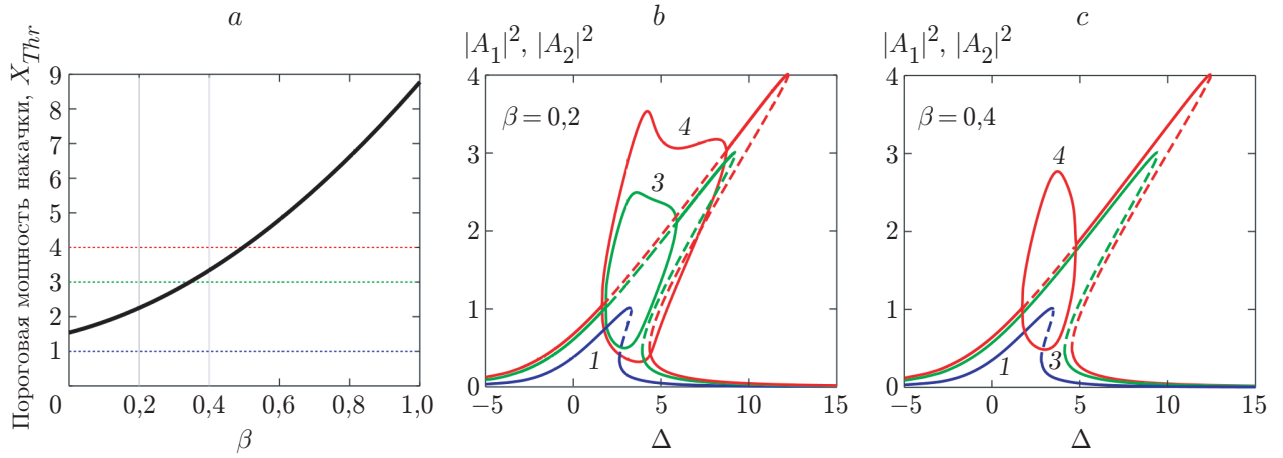


Рис. 3. Результаты теоретического исследования: пороговое значение мощности накачки X_{Thr} , при котором происходит спонтанное нарушение симметрии, как функция рэлеевского коэффициента β (a). Стационарные состояния системы (1)–(2) при $\beta = 0,2$ (b) и $\beta = 0,4$ (c). Сплошные кривые на панелях (b, c) соответствуют устойчивым ветвям, пунктирные — неустойчивым ветвям решений, цифры соответствуют значениям X

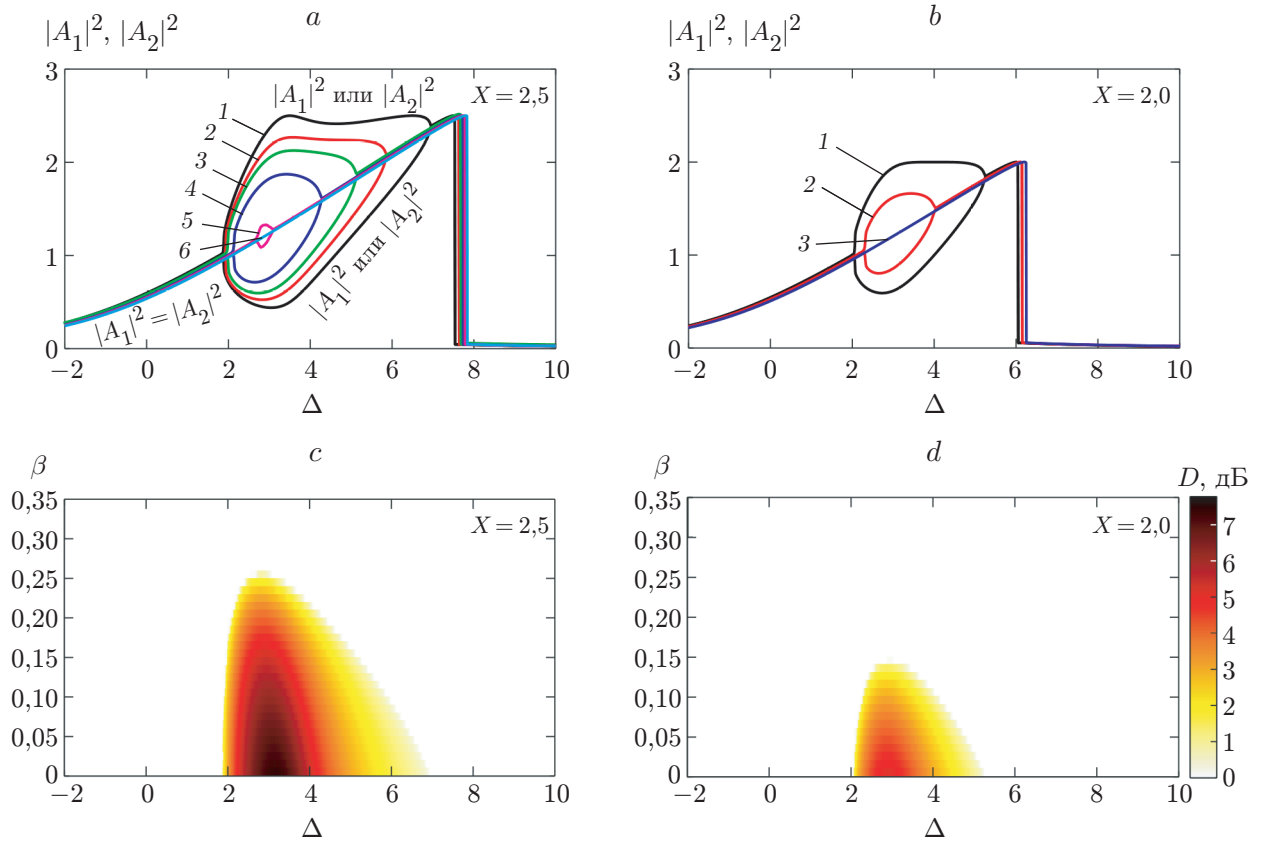


Рис. 4. Результаты численного моделирования. Стационарные состояния системы (1)–(2) при $X = 2,5$ (a) и $X = 2$ (b), найденные путём интегрирования динамической системы при увеличении Δ . Резкие вертикальные скачки кривых соответствуют переходу с одной стационарной ветки на другую, когда заканчивается ветка. На панели a кривые 1–6 построены для разных β в диапазоне от 0 до 0,3 с шагом 0,05. На панели b кривые 1–3 построены для разных β в диапазоне от 0 до 0,2 с шагом 0,1. Функция асимметрии $D = 10 \times \log_{10}(\max(|A_{1,2}|^2/|A_{2,1}|^2))$ показана в зависимости от двух параметров — Δ и β при $X = 2,5$ (c) и $X = 2$ (d)

устойчивые стационарные состояния $|A_1|^2$ и $|A_2|^2$, полученные путём интегрирования динамической системы при разных значениях рэлеевского коэффициента связи, показаны на рис. 4, *a*, *b* для мощностей накачки $X = 2,5$ и $X = 2$ соответственно. Устойчивые стационарные решения, найденные при интегрировании динамической системы, совпадают с аналитическими решениями на соответствующих ветках. Резкие вертикальные скачки кривых соответствуют переходу с одной стационарной ветки на другую, когда заканчивается ветка. При бифуркации «вилка» случайным образом определяется, для какой из волн интенсивность будет больше, а для какой — меньше. Чем больше коэффициент β , тем меньше область существования решений со спонтанно нарушенной симметрией.

Далее введём функцию асимметрии $D = 10 \times \log_{10} (\max(|A_{1,2}|^2/|A_{2,1}|^2))$ и построим её в зависимости от двух параметров — отстройки и рэлеевского коэффициента при $X = 2,5$ (рис. 4, *c*) и при $X = 2$ (рис. 4, *d*). Данные зависимости наглядно демонстрируют, что с увеличением коэффициента рассеяния асимметрия уменьшается: чем меньше мощность накачки, тем меньше D .

Заключение. В работе экспериментально и теоретически исследовано спонтанное нарушение симметрии в стеклянных диэлектрических микросферах с керровской нелинейностью с учётом линейного рэлеевского рассеяния между встречными волнами при двунаправленной симметричной оптической накачке. При слабом рэлеевском рассеянии экспериментально наблюдалось возникновение асимметричных состояний света при определённых значениях отстройки накачки от точного резонанса, в то время как при сильном рэлеевском рассеянии, соответствующем сильно расщеплённому линейному резонансу, в нелинейном режиме при доступных мощностях накачки реализовывались только симметричные состояния света (с равными мощностями в каждом канале при всех значениях отстройки). Теоретически получены значения пороговых мощностей накачки от коэффициента рэлеевского рассеяния β ; чем больше β , тем выше порог, что согласуется с экспериментом. Теоретически показано, что увеличение рэлеевского коэффициента связи между противоположно распространяющимися волнами приводит к сужению области отстройки частоты накачки от частоты точного резонанса, в которой реализуется спонтанное нарушение симметрии, а также к уменьшению асимметрии состояний света.

Финансирование. Экспериментальное и теоретическое исследования спонтанного нарушения симметрии поддержаны Российским научным фондом (грант № 20-72-10188-П). Разработка численного кода частично поддержана Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ИПФ РАН № FFUF-2024-0030.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beekman A. J., Rademaker L., van Wezel J. An introduction to spontaneous symmetry breaking // SciPost Phys. Lecture Notes. 2019. **11**. DOI: 10.21468/SciPostPhysLectNotes.11.
2. Malomed B. A. Spontaneous Symmetry Breaking, Self-Trapping, and Josephson Oscillations // Progress in Optical Science and Photonics. Berlin—Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. 707 p.
3. Del Bino L., Silver J. M., Stebbings S. L., Del’Haye P. Symmetry Breaking of Counter-Propagating Light in a Nonlinear Resonator // Sci. Rep. 2017. **7**. 43142. DOI: 10.1038/srep43142.
4. Woodley M. T. M., Hill L., Del Bino L. et al. Self-Switching Kerr Oscillations of Counterpropagating Light in Microresonators // Phys. Rev. Lett. 2021. **126**. 043901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.043901.
5. Dikandé Bitha R. D., Giraldo A., Broderick N. G. R., Krauskopf B. Bifurcation analysis of complex switching oscillations in a Kerr microring resonator // Phys. Rev. E. 2023. **108**. 064204. DOI: 10.1103/PhysRevE.108.064204.

6. **Kaplan A. E., Meystre P.** Directionally asymmetrical bistability in a symmetrically pumped nonlinear ring interferometer // Opt. Commun. 1982. **40**, N 3. P. 229–232. DOI: 10.1016/0030-4018(82)90267-x.
7. **Gorodetsky M. L., Pryamikov A. D., Ilchenko V. S.** Rayleigh scattering in high- Q microspheres // JOSA. 2000. **17**, N 6. P. 1051–1057. DOI: 10.1364/JOSAB.17.001051.
8. **Spolitis S., Murnieks R., Skladova L. et al.** IM/DD WDM-PON Communication System Based on Optical Frequency Comb Generated in Silica Whispering Gallery Mode Resonator // IEEE Access. 2021. **9**. P. 66335–66345. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3076411.
9. **Andrianov A. V., Anashkina E. A.** Single-mode silica microsphere Raman laser tunable in the U-band and beyond // Results in Physics. 2020. **17**. 103084. DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103084.
10. **Anashkina E. A., Andrianov A. V.** Switchable Cascade Raman Lasing in a Tellurite Glass Microresonator // ACS Photonics. 2023. **10**, Iss. 5. P. 1485–1494. DOI: 10.1021/acsp Photonics.3c00070.
11. **Anashkina E. A., Andrianov A. V.** Brillouin Lasing in a Silica Microsphere With Allowance for Rayleigh Scattering // IEEE Photon. Technol. Lett. 2024. **36**, Iss. 18. P. 1121–1124. DOI: 10.1109/LPT.2024.3444328.
12. **Kondratiev N. M., Lobanov V. E.** Modulational instability and frequency combs in whispering-gallery-mode microresonators with backscattering // Phys. Rev. A. 2020. **101**. 013816. DOI: 10.1103/PhysRevA.101.013816.

Поступила в редакцию 10.10.2024

После доработки 08.11.2024

Принята к публикации 11.11.2024
