

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 535.92

ГЕНЕРАЦИЯ ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА–
БРИЛЛЮЭНА В КОЛЬЦЕВОМ ВОЛОКОННОМ РЕЗОНАТОРЕ С
СОХРАНЕНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРИ НАКАЧКЕ УЗКОПОЛОСНЫМ
СКАНИРУЮЩИМ ЛАЗЕРОМ¹

©2026 г. И. С. Паняев^{a,*}, П. А. Итрин^a, Д. П. Качалкин^a, М. В. Прибылов^a,
А. И. Абанин^a, Д. А. Коробко^a, А. А. Фотиади^{a,b}

^a Ульяновский государственный университет

Россия, 432017, Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42.

^b Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

*E-mail: panyayev.ivan@rambler.ru

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 03.06.2026

Принята к публикации 16.07.2026

Исследована генерация вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) в кольцевом волоконном резонаторе с сохранением поляризации при накачке узкополосным сканирующим лазером. Использование компонентов с сохранением поляризации в настоящей работе позволило исключить влияние поляризационного шума и наблюдать генерацию ВРМБ в отдельных модах резонатора. Резонатор длиной около 2.9 м был сформирован путем сварки двух свободных концов ответвителя 99/1. При мощности накачки до 55 мВт в диапазоне 1520–1570 нм зарегистрированы пять отдельных областей генерации. В отличие от прежних работ, в данном эксперименте удалось наблюдать генерацию ВРМБ в отдельных модах кольцевого резонатора внутри указанных областей и определить ее параметры. Показано, что средний межмодовый интервал соответствует области свободной резонатора, а порог генерации возрастает с увеличением длины волны, изменяясь от 15 до 40 мВт для различных областей генерации. Это связано с увеличением коэффициента связи, т. е. с уменьшением добротности резонатора с ростом длины волны, что приводит к снижению эффективности генерации. Радиочастотный спектр излучения ВРМБ содержит пять максимумов в диапазоне 10.74–11.02 ГГц, соответствующих бриллюэновскому сдвигу в указанных областях.

Ключевые слова: ВРМБ-лазер, высокодобротный резонатор, узкополосная генерация, распределенные волоконные датчики, микроволновая фотоника.

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) является наиболее низкороговым нелинейным процессом в оптическом волокне, оно широко используется для генерации узкополосного излучения в волоконных лазерных системах [1–8]. Особый интерес представляют бриллюэновские лазеры с кольцевыми резонаторами, поскольку они позволяют реализовать высокую спектральную чистоту излучения в одночастотном режиме [9–13]. Такие системы находят применение в когерентных задачах оптических измерений, микроволновой фотонике [14–17] и распределенном волоконно-оптическом зондировании [18–21].

Для генерации ВРМБ в коротких кольцевых резонаторах критично выполнение условия двойного резонанса, при котором моды резонатора оказываются одновременно согласованными с излучением накачки и стоксовой компонентой. В этом случае порог бриллюэновской генерации существенно снижается, а эффективность межмодового взаимодействия возрастает. Как было показано ранее, при сканировании длины волны узкополосной накачки ВРМБ в коротких кольцевых резонаторах возникает не во всем диапазоне перестройки, а лишь в отдельных спектральных областях [22]. Это связано с тем, что бриллюэновский частотный сдвиг зависит от длины волны накачки, тогда как межмодовый интервал резонатора (FSR) определяется его длиной. Поэтому генерация реализуется в тех участках спектра, где бриллюэновский сдвиг оказывается кратным межмодовому интервалу резонатора. Для коротких резонаторов такие области могут быть спектрально разделены, тогда как с увеличением длины резонатора они начинают перекрываться.

Ранее эти эффекты исследовались в кольцевых резонаторах на основе стандартного одномодового волокна [22, 23]. Для настройки режима генерации в таких схемах использовались контроллеры поляризации. Это усложняет эксперимент, поскольку в подобных условиях резонансные особенности ВРМБ могут маскироваться эффектами, связанными с изменением поляризации излучения. В результате снижается воспроизводимость и затрудняется анализ тонкой структуры бриллюэновской генерации.

В настоящей работе экспериментально исследуется генерация ВРМБ в кольцевом волоконном резонаторе при накачке узкополосным сканирующим лазером. Резонатор полностью выполнен на волокне, сохраняющем поляризацию (РМ). Использование РМ-компонентов позволяет уменьшить влияние поляризационных флуктуаций и исключить взаимовлияние поляризационных мод, создавая более стабильные условия для наблюдения генерации [24, 25]. Эксперименты проводились в коротком резонаторе, где большой межмодовый интервал позволил не только выделить отдельные спектральные области, но и наблюдать генерацию в отдельных модах резонатора. Особое внимание уделено изучению

тонкой структуры этих областей, анализу их связи с FSR резонатора и величиной бриллюэновского частотного сдвига, а также возможностям, которые РМ-конфигурация открывает для прецизионных исследований бриллюэновского межмодового взаимодействия.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве источника накачки использовался узкополосный перестраиваемый по длине волны лазер Santec TSL-550-C, обеспечивающий квазинепрерывную перестройку в широком спектральном диапазоне. В настоящей работе диапазон сканирования был ограничен полосой усиления эрбиевого волоконного усилителя, он составлял 1520–1570 нм.

Рис. 1. Схема эксперимента

Выходное излучение лазера проходило через оптический изолятор, после чего усиливалось в эрбиевом волоконном усилителе, выполненном полностью на волокне, сохраняющем поляризацию. Это позволяло увеличить мощность накачки примерно до 55 мВт без заметного уширения линии генерации. Контроль мощности накачки осуществлялся при помощи оптического ответвителя и перестраиваемого аттенюатора. Усиленный сигнал проходил через оптический циркулятор и подавался на вход исследуемого кольцевого резонатора. Резонатор длиной около 2.9 м был изготовлен на основе стандартного РМ-волоконного ответвителя 99/1 путем сварки двух его свободных концов. Выбор малого коэффициента связи был обусловлен необходимостью формирования высокодобротного резонатора. Использование РМ-компонентов во всей схеме минимизировало влияние поляризационных флуктуаций и исключало необходимость дополнительной подстройки состояния поляризации.

При выполнении условий двойного резонанса в кольцевом резонаторе возникала генерация сигнала ВРМБ. Встречный стоксов сигнал направлялся циркулятором на выходной порт схемы и регистрировался фотодетектором. На том же порту всегда присутствовал слабый сигнал на частоте накачки, обусловленный встречным рэлеевским рассеянием и паразитными обратными отражениями на сварках волоконных соединений. Наличие обоих оптических компонентов на фотодетекторе позволяло не только регистрировать мощность ВРМБ, но и наблюдать радиочастотные биения между накачкой и стоксовой волной на их разностной частоте.

Для регистрации сигнала от фотодетектора использовался цифровой осциллограф. Сканирование длины волны задающего лазера синхронизировалось с его разверткой таким образом, чтобы начало развертки соответствовало началу прохода по исследуемому спектральному диапазону, а окончание – завершению сканирования. Это позволяло

регистрировать спектральное распределение мощности сигнала ВРМБ по временной осциллограмме. Для исследования радиочастотной структуры выходного сигнала дополнительно использовался радиочастотный спектроанализатор.

Таким образом, экспериментальная схема обеспечивала одновременную регистрацию спектральных областей генерации ВРМБ, структуры отдельных резонансных пиков кольцевого резонатора и радиочастотных биений, соответствующих разностной частоте накачки и стоксовой компоненты.

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проводились при непрерывном сканировании длины волны накачки в диапазоне 1520–1570 нм со скоростью 1 нм/с. Для анализа распределения мощности ВРМБ в широком диапазоне длин волн использовалось многократное сканирование с последующим усреднением осциллограмм. Усреднение выполнялось по 32 проходам лазерного источника. Такой режим позволял подавить случайные флуктуации сигнала и выделить устойчивые спектральные области генерации, а также оценить их положение, ширину и относительную интенсивность.

Наряду с усредненными спектрами регистрировались осциллограммы, полученные при однократном сканировании длины волны накачки. Этот режим был необходим для исследования тонкой структуры сигнала внутри выделенных областей генерации. Он позволял разрешать отдельные резонансные пики кольцевого резонатора, определять межмодовый интервал и оценивать ширину резонансных максимумов. Сопоставление данных, полученных при однократном и многократном сканировании, дало возможность разделить усредненные спектральные характеристики генерации и параметры отдельных мод резонатора.

Для определения пороговых характеристик ВРМБ измерения повторялись при различных значениях мощности накачки. Порог генерации оценивался как минимальная мощность, при которой в соответствующей спектральной области сигнал ВРМБ становился выше фонового уровня. Такой подход использовался для сравнения порогов генерации в разных областях.

Дополнительно исследовалась радиочастотная структура сигнала, регистрируемого на выходе циркулятора. Для этого сигнал подавался на радиочастотный спектроанализатор, работавший в режиме удержания максимума при многократном сканировании длины волны накачки. Наблюдаемые радиочастотные пики интерпретировались как биения между встречным сигналом накачки и стоксовой компонентой ВРМБ. Это позволило измерить бриллюэновский частотный сдвиг в различных спектральных областях и сопоставить его с данными, полученными из оптических спектров.

Для количественного анализа параметров резонатора в каждой области генерации выбирались ограниченные спектральные участки, внутри которых определялись положения соседних резонансных пиков и их ширина на полувысоте. По среднему расстоянию между соседними максимумами находился межмодовый интервал резонатора, а по ширине отдельных пиков оценивались спектральные характеристики генерации. Для повышения достоверности результатов такой анализ проводился по совокупности большого числа пиков внутри каждой исследуемой области.

В целом примененная методика позволяла исследовать как общую спектральную картину генерации ВРМБ в кольцевом РМ-волоконном резонаторе, так и параметры отдельных резонансных мод, а также сопоставлять оптические и радиочастотные проявления бриллюэновского взаимодействия.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2 представлен усредненный спектр мощности ВРМБ, полученный при мощности накачки 55 мВт на длине волны 1550 нм. Максимальная мощность сигнала ВРМБ на выходе циркулятора достигала примерно 1 мВт. В исследованном диапазоне 1520–1570 нм наблюдаются пять отдельных областей генерации с центрами вблизи значений длин волн 1524.6, 1533.3, 1543.4, 1553.8 и 1563.5 нм. Среднее расстояние между соседними областями составляет 10 ± 1.4 нм. Нижняя огибающая сигнала ВРМБ повторяет форму спектра накачки, что указывает на влияние спектральной зависимости мощности усиленного сигнала на картину генерации. Значения ширины выделенных областей на полувысоте составляют 3.7, 4.3, 3.4, 2.5 и 1.9 нм соответственно. Максимальные значения мощности сигнала ВРМБ в разных областях различаются, что, по-видимому, связано со спектральной зависимостью коэффициента связи ответвителя, формирующего кольцевой резонатор. С увеличением длины волны коэффициент связи возрастает, добротность резонатора уменьшается, а порог генерации повышается.

Рис. 2. Усредненный по 32 проходам спектр мощности ВРМБ,

При увеличении мощности накачки мощность сигнала ВРМБ возрастала почти линейно. Пороговая мощность генерации зависела от спектральной области, она составляла около 15 мВт для области с центром 1524.6 нм, около 30 мВт для области вблизи 1553.8 нм и около 40 мВт для области вблизи 1563.5 нм. Таким образом, с ростом длины волны наблюдается систематическое увеличение порога генерации, что согласуется с уменьшением добротности резонатора.

Пороговая мощность накачки при генерации ВРМБ в кольцевом резонаторе может быть оценена следующим образом. Величина ВРМБ-усиления на длине кольца L_R составляет

$G = \exp(g_B P_L L_R / A_{eff})$, где g_B – коэффициент бриллюэновского усиления в оптическом волокне (для кварцевого волокна $g_B = 5 \cdot 10^{-9}$ см/Вт, P_L – мощность волны накачки внутри кольца, A_{eff} – эффективная площадь моды, в нашем случае оценка дает $A_{eff} \sim 86$ мкм²). Мощность волны накачки внутри кольца P_L связана с мощностью накачки в подводящем волокне кольца P_{L0} формулой $P_L = P_{L0} k / (1 - \sqrt{(1-a)(1-k)})^2$, где k – коэффициент связи ответвителя (в нашем случае для однопроцентного ответвителя $k = 0.01$), a – потери волокна резонатора. В случае критической связи $k = a$. Генерация стоксовой волны в резонаторе начинается тогда, когда при росте мощности накачки ВРМБ усиление в кольце становится достаточно велико, чтобы компенсировать потери, связанные с выходом генерируемой волны через ответвитель, т.е. когда $G = k$. Отсюда пороговое значение мощности входного сигнала накачки может быть найдено следующим образом:

$$P_{L_0} = -\frac{\ln k}{k} \frac{(1 - \sqrt{(1-a)(1-k)})^2}{g_B L_R} A_{eff} \sim 28 \text{ мВт}.$$

Эта оценка по порядку величины совпадает с данными эксперимента, где порог менялся от 15 мВт при малых длинах волн до 40 мВт при больших длинах волн. Причины этого изменения порога уже обсуждались выше.

Более детальная информация о структуре спектра была получена в режиме однократного сканирования длины волны накачки. Как видно из рис. 3, каждая область генерации состоит из большого числа узких резонансных пиков, соответствующих модам кольцевого резонатора. Каждому такому пику в спектре ВРМБ соответствует резонансный провал в спектре проходящего сигнала на 99-процентном выходе ответвителя, образующего резонатор. Сопоставление усредненных и однопроходных спектров показало, что усреднение удобно для определения положения и ширины областей генерации, но при этом оно приводит к расплыванию резонансных пиков и делает невозможным их детальный анализ. Поэтому количественная оценка межмодового интервала и ширины отдельных резонансов выполнялась по данным однократного сканирования.

Рис. 3. Типичный однопроходный спектр мощности ВРМБ...

Для количественного анализа в центральной части каждой области генерации выделялись участки шириной 1 нм. В первых четырех областях на таком участке наблюдалось в среднем около 1800 резонансных пиков, тогда как в длинноволновой области их число уменьшалось примерно до 270 из-за меньшей мощности сигнала ВРМБ. Статистический анализ показал, что в первых четырех областях средний частотный интервал между соседними пиками составляет около 70 МГц, что соответствует межмодовому интервалу резонатора и

согласуется с его длиной примерно 2.9 м. В последней области разброс значений FSR и ширины пиков существенно больше, что объясняется низким уровнем сигнала.

Значения ширины резонансных пиков на полувысоте для первых четырех областей следующие: 1.2 МГц для первой области, 1.07 МГц для второй, 870 кГц для третьей и 700 кГц для четвертой. Таким образом, с увеличением длины волны наблюдается тенденция к уменьшению ширины отдельных резонансных пиков. Наиболее вероятно, что эта особенность также связана с изменением коэффициента связи и добротности кольцевого резонатора в исследуемом спектральном диапазоне.

Дополнительные сведения о бриллюэновском взаимодействии были получены при анализе радиочастотного спектра сигнала, зарегистрированного на выходе циркулятора в режиме удержания максимума при 32-кратном сканировании длины волны накачки. На рис. 4 видно, что радиочастотный спектр содержит пять ярко выраженных максимумов на частотах 10.74, 10.81, 10.88, 10.95 и 11.02 ГГц. Каждый из этих максимумов соответствует одной из пяти наблюдаемых спектральных областей генерации ВРМБ. При этом длинноволновой области вблизи 1563 нм соответствует пик 10.74 ГГц, а коротковолновой области вблизи 1524 нм – пик 11.02 ГГц. Ширина каждого радиочастотного пика совпадает с шириной резонансных пиков в соответствующей области оптического спектра, что подтверждает прямую связь между модовой структурой кольцевого резонатора и радиочастотной картиной бриллюэновского сигнала.

Рис. 4. Радиочастотный спектр сигнала ВРМБ

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты подтверждают, что генерация ВРМБ в коротком кольцевом резонаторе имеет выраженно селективный по длине волны характер. В процессе сканирования длины волны накачки бриллюэновский частотный сдвиг изменяется, тогда как межмодовый интервал резонатора остается практически постоянным и определяется его длиной. Условия эффективной генерации выполняются только в тех спектральных областях, где бриллюэновский сдвиг становится близким к целому числу FSR резонатора. Этим объясняется появление пяти отдельных областей генерации ВРМБ в исследованном диапазоне длин волн.

С физической точки зрения наблюдаемая структура соответствует последовательному прохождению диапазонов длин волн, в которых выполняются условия двойного резонанса. Вне этих областей либо накачка, либо стоксовая компонента, либо обе волны одновременно оказываются вне моды кольцевого резонатора, и эффективность бриллюэновского взаимодействия резко падает. В этом смысле полученные данные качественно согласуются с существующими представлениями о ВРМБ в коротких кольцевых резонаторах. Вместе с тем

применение РМ-компонентов позволило наблюдать эту картину в более устойчивой и повторяемой манере без дополнительной поляризационной подстройки.

Одним из основных результатов настоящей работы является экспериментальная демонстрация генерации ВРМБ в отдельных модах кольцевого резонатора внутри каждой спектральной области. В прежних экспериментах основное внимание уделялось положению самих областей генерации и условиям настройки двойного резонанса, тогда как в данном случае удалось перейти к анализу тонкой модовой структуры сигнала. Такая возможность обусловлена малой длиной резонатора и, как следствие, достаточно большим межмодовым интервалом (порядка 70 МГц). При меньшем FSR отдельные моды сближались бы и структуру было бы значительно труднее разрешить экспериментально.

Наблюдаемое увеличение порога генерации с ростом длины волны, по-видимому, связано со спектральной зависимостью коэффициента связи ответвителя, формирующего кольцевой резонатор. Увеличение коэффициента связи означает рост потерь на вывод излучения из кольца и, соответственно, уменьшение добротности резонатора. Это приводит к снижению накопления оптической мощности в резонаторе и уменьшению эффективности ВРМБ, что проявляется в росте порога генерации и изменении ширины отдельных резонансных пиков.

Отдельного внимания заслуживает радиочастотное представление результатов. Наличие в обратном сигнале одновременно остаточной накачки и стоксовой компоненты позволило регистрировать их биения на частоте бриллюэновского сдвига. Таким образом, информация о бриллюэновском взаимодействии между оптическими полями преобразуется в радиочастотную область, что позволяет наблюдать эволюцию бриллюэновского сдвига непосредственно на радиочастотном спектроанализаторе. Пять максимумов в радиочастотном спектре естественным образом сопоставляются с пятью выделенными областями генерации ВРМБ в оптическом диапазоне. Каждая из этих областей соответствует собственному значению бриллюэновского сдвига и собственному набору условий межмодового согласования.

В целом полученные результаты показывают, что сканирование частоты накачки является удобным инструментом для изучения бриллюэновского межмодового взаимодействия в коротких РМ-резонаторах. Такая система позволяет одновременно анализировать спектральные области генерации, параметры отдельных резонансных мод и соответствующие им радиочастотные биения. Это создает основу для дальнейших исследований механизмов ВРМБ в резонаторных структурах, а также возможностей практического использования подобных схем в узкополосных волоконных источниках, радиофотонных системах и сенсорных приложениях.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально исследована генерация вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в коротком кольцевом РМ-волоконном резонаторе при накачке узкополосным сканирующим лазером. Показано, что в исследуемом спектральном диапазоне генерация ВРМБ реализуется не непрерывно, а в виде нескольких отдельных спектральных областей, что обусловлено выполнением условия кратности бриллюэновского частотного сдвига межмодовому интервалу резонатора.

Установлено, что использование РМ-компонентов позволяет уменьшить влияние поляризационных флуктуаций и исключить необходимость дополнительной поляризационной подстройки, что обеспечивает более устойчивое наблюдение резонансной структуры ВРМБ. Благодаря большому межмодовому интервалу короткого резонатора удалось экспериментально разрешить генерацию ВРМБ в отдельных модах кольцевого резонатора внутри выделенных спектральных областей и определить их основные параметры.

Показано, что средний межмодовый интервал соответствует FSR резонатора, а порог генерации возрастает с увеличением длины волны. Получены также радиочастотные спектры сигнала ВРМБ, содержащие максимумы, соответствующие выделенным оптическим областям генерации и значениям бриллюэновского сдвига. Это подтверждает возможность эффективного представления процессов бриллюэновского взаимодействия в радиочастотной области.

Полученные результаты в целом согласуются с существующими представлениями о ВРМБ в коротких кольцевых резонаторах, но одновременно демонстрируют, что РМ-конфигурация открывает дополнительные возможности для исследований бриллюэновского межмодового взаимодействия, накопления статистики параметров отдельных мод и прямого радиочастотного анализа эволюции бриллюэновского сдвига. Это делает короткие кольцевые резонаторы на основе волокна, сохраняющего поляризацию, перспективной платформой как для фундаментальных исследований новых эффектов ВРМБ в резонаторах [26–32], так и для разработки узкополосных волоконных источников и перспективных систем распределенного мониторинга на их основе [33–40].

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда: грант № 23-79-30017 (разделы 1-3), грант № 25-72-10174 (разделы 4-6).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ostermeyer M., Kong H.J., Kovalev V.I. et al. Laser Part. Beams. 2008. V. 26. P. 297
<https://doi.org/10.1017/S0263034608000335>
2. Fotiadi A., Rafailov E., Korobko D. et al. Sensors. 2023. V. 23. P. 1715.
<https://doi.org/10.3390/s23031715>
3. Spirin V.V., Kellerman J., Swart P.L., Fotiadi A.A. Intensity noise in SBS with injection locking generation of Stokes seed signal Opt. Express. 2006. V. 14. P. 8328.
<https://doi.org/10.1364/OE.14.008328>
4. Popov S.M., Butov O.V., Chamorovski Y.K. et al. Results Phys. 2018. V. 9. P. 806.
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.03.044>
5. Popov S.M., Butov O.V., Chamorovskiy Y.K. et al. Results Phys. 2018. V. 9. P. 625.
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.03.023>
6. Spirin V. V., Castro M., López-Mercado C. A., Mégret P., Fotiadi A. A. Laser Phys. 2012. V. 22. P. 760 <https://doi.org/10.1134/S1054660X12040214>
7. Kamynin V. A., Filatova S. A., Mullanurov T. I. et al. Photonics. 2024. V. 11. P. 30.
<https://doi.org/10.3390/photonics11010030>
8. Popov S.M., Chamorovski Y.K., Isaev V.A. et al. Results Phys. 2017. V. 7. P. 852.
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.01.034>
9. Spirin V.V., Bueno Escobedo J.L., Miridonov S.V. et al. Opt. Laser Technol. 2021. V. 141. P. 107156. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107156>
10. Spirin V.V., Bueno Escobedo J.L., Korobko D.A., Mégret P., Fotiadi A.A. Opt. Express. 2020. V. 28. P. 37322. <https://doi.org/10.1364/OE.406040>
11. Preda C.E., Fotiadi A.A., Megret P. Opt. Express. 2012. V. 20. P. 5783.
<https://doi.org/10.1364/OE.20.005783>
12. Wang Z., Jiang Y., Chen F., Cui J. 65 Opt. Express. 2025. V. 33. P. 25743.
<https://doi.org/10.1364/OE.562590>
13. Liu K., Nelson K.D., Behunin R.O., Blumenthal D.J. Nat. Commun. 2025. V. 16. P. 6419.
<https://doi.org/10.1038/s41467-025-61637-w>
14. Parihar R., Lai C.K., Zhang Z. et al. Photonics. 2025. V. 10. P. 010803.
<https://doi.org/10.1063/5.0236905>
15. Merklein M., Goulden L., Kiewiet M. et al. Photonics. 2024. V. 9. P. 056107.
<https://doi.org/10.1063/5.0193174>
16. Garrett M., Merklein M., Eggleton B.J. Quant. Electron. 2023. V. 29. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/JSTQE.2022.3197766>

17. Merklein M., Kabakova I.V., Zarifi A., Eggleton B.J. Appl. Phys. Rev. 2022. V. 9.
<https://doi.org/10.1063/5.0095488>
18. Φοτιάδης Α.Α., Κορόμπκο Δ.Α., Ζολотовский И.О. Автометрия Т. 59. № 1. 2023. С. 74.
<https://doi.org/10.15372/AUT20230108>
[Fotiadi A.A., Korobko D.A., Zolotovskii I.O. Optoelectron. Instrum. Data Process. 2023. V. 59,
№ 1. P. 66. <https://doi.org/10.3103/S8756699023010065>]
19. Rossi L., Bastianini F., Bolognini G. J. Eur. Opt. Soc.: Rapid Publ. 2022. V. 18. P. 5.
<https://doi.org/10.1051/jeos/2022005>
20. Rossi L., Marini D., Bastianini F., Bolognini G. Opt. Express. 2019. V. 27. P. 29448.
<https://doi.org/10.1364/OE.27.029448>
21. Rossi L., Marini D., Bastianini F., Bolognini G. IEEE Sensors. 2020. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/SENSORS47125.2020.9278695>
22. Spirin V.V., López-Mercado C.A., Kablukov S.I. et al. Opt. Lett. 2013. V. 38. P. 2528.
<https://doi.org/10.1364/OL.38.002528>
23. López-Mercado C.A., Spirin V.V., Kablukov S.I. et al. Opt. Fiber Technol. 2014. V. 20. P. 194.
<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2014.01.011>
24. Bueno Escobedo J.L., Spirin V.V., López-Mercado C.A. et al. Results Phys. 2016. V. 6. P. 59.
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2016.01.017>
25. Caucheteur C., Fotiadi A.A., Megret P. et al. Electron. Lett. 2006. V. 42. P. 1339
<https://doi.org/10.1049/el:20062610>
26. Korobko D., Zolotovskii I., Svetukhin V. et al. Opt. Express. 2020. V. 28. P. 4962.
<https://doi.org/10.1364/OE.382357>
27. Mukhamedyanov A., Andrianov E., Zyablovsky A. Phys. Lett. A. 2026. V. 581.
<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2026.131540>
28. Mukhamedyanov A.R., Andrianov E.S., Zyablovsky A.A. Opt. Lett.. 2025. V. 50. P. 6121.
<https://doi.org/10.1364/OL.571381>
29. Mukhamedyanov A., Zyablovsky A.A., Andrianov E.S. Opt. Lett. 2024. V. 49. P. 782.
<https://doi.org/10.1364/OL.510995>
30. Mukhamedyanov A.R., Andrianov E.S., Zyablovsky A.A. J. Opt. Soc. Am. B. 2024. V. 42. P. 79.
<https://doi.org/10.1364/JOSAB.538397>
31. Mukhamedyanov A., Andrianov E.S., Zyablovsky A.A. Phys. Rev. A. 2025. V. 111. P. 023519.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.111.023519>
32. Mukhamedyanov A.R., Zyablovsky A.A., Andrianov E.S. Opt. Lett. 2023. V. 48. P. 1822.
<https://doi.org/10.1364/OL.485245>

33. *Bueno Escobedo J.L., Spirin V.V., López-Mercado C.A. et al.* Results Phys. 2017. V. 7. P. 641.
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.01.013>
34. *Bueno Escobedo J. L., Jason J., López-Mercado C. A. et al.* Results Phys. 2019. V. 12. P. 1840.
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.02.023>
35. *Turov A.T., Konstantinov Y.A., Barkov F.L., et al.* Algorithms. 2023. V. 16. P. 217.
<https://doi.org/10.3390/a16050217>
36. *Faustov A.V., Gusarov A.V., Mégret P. et al.* Results Phys. 2016. V. 6. P. 86.
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2016.02.001>
37. *Panyaev I.S., Itrin P.A., Korobko D.A., Fotiadi A.A. J.* Lightwave Technol. 2024. V. 42. P. 2928–2937. <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3348994>
38. *Lobach I.A., Fotiadi A.A., Yatseev V.A. et al.* Sensors. 2024. V. 24. P. 5432.
<https://doi.org/10.3390/s24165432>
39. *Turov A., Fotiadi A., Korobko D. et al.* Sensors. 2025. P. 7225.
<https://doi.org/10.3390/s25237225>
40. *Turov A.T., Barkov F.L., Konstantinov Y.A. et al.* Algorithms. 2023. V. 16. P. 440.
<https://doi.org/10.3390/a16090440>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема эксперимента: ПЛИ – перестраиваемый по длине волны узкополосный лазерный источник, ИЗО – оптический изолятор, ВАР АТТ– перестраиваемый оптический аттенюатор, ВЭУ – волоконный эрбиевый усилитель, О1 – оптический ответвитель 99/1 для контроля мощности накачки, ЦИР – оптический циркулятор, О2 – оптический ответвитель 99/1, образующий исследуемый волоконный кольцевой резонатор, ФД– фотодетектор. Красными стрелками обозначено направление распространения сигнала накачки, а синими – стоксовой компоненты бриллюэновского сигнала
- Рис. 2.** Усредненный по 32 проходам спектр мощности ВРМБ, снятый с порта 3 циркулятора (синяя линия); сглаженная при помощи усреднения огибающая спектра (красная штриховая кривая); черная линия – спектр выходной мощности EDFA
- Рис. 3.** **а** – Типичный “однопроходный” спектр мощности ВРМБ, **б** – увеличенная выделенная красными штриховыми вертикальными линиями область на панели **а**, **в** –увеличенная выделенная красными штриховыми вертикальными линиями область на панели **б**. Вставка на панели **в** – увеличенная выделенная красными штриховыми вертикальными линиями область. Резонансный пик на вставке аппроксимирован распределением Лоренца, приведено значение ширины лоренцевой линии
- Рис. 4.** Радиочастотный спектр сигнала ВРМБ

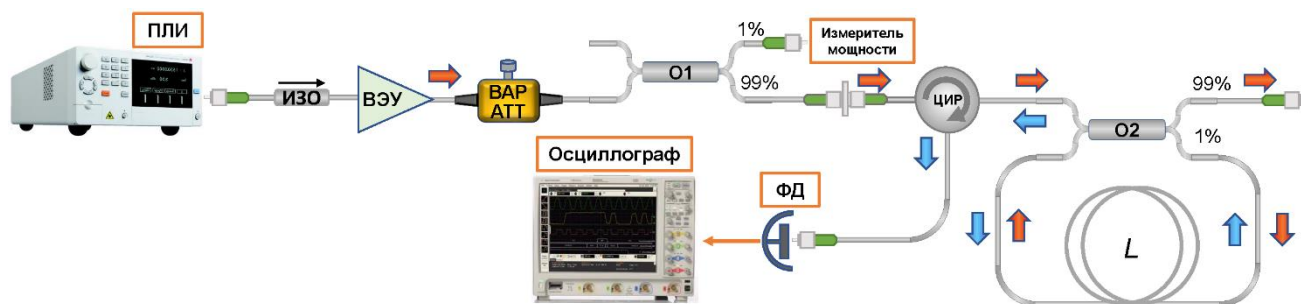


Рис. 1.

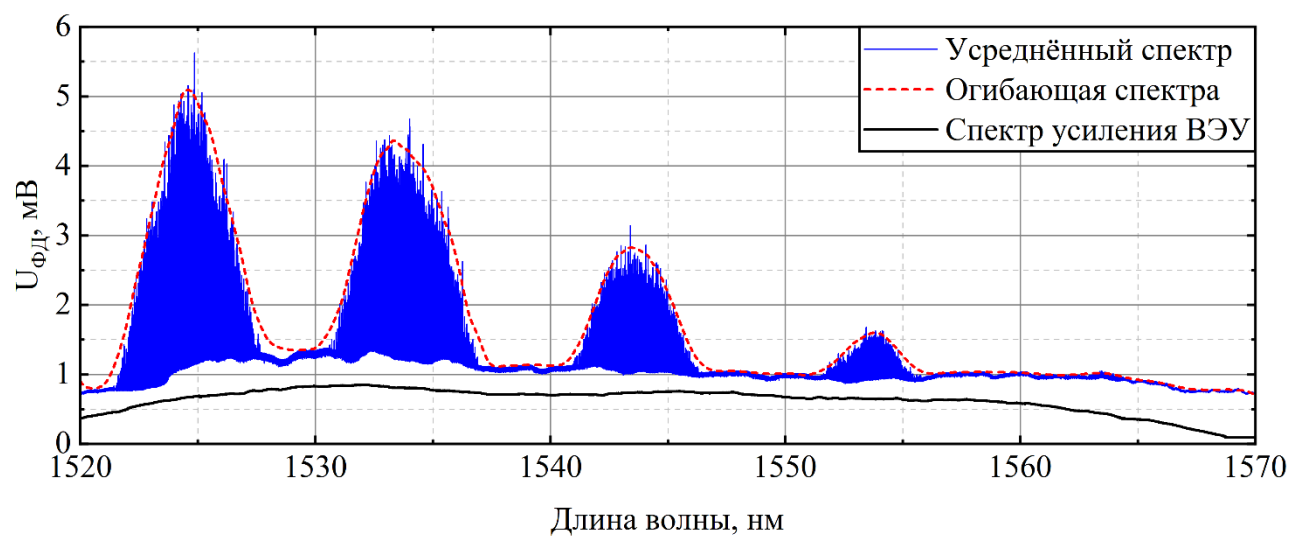


Рис. 2.

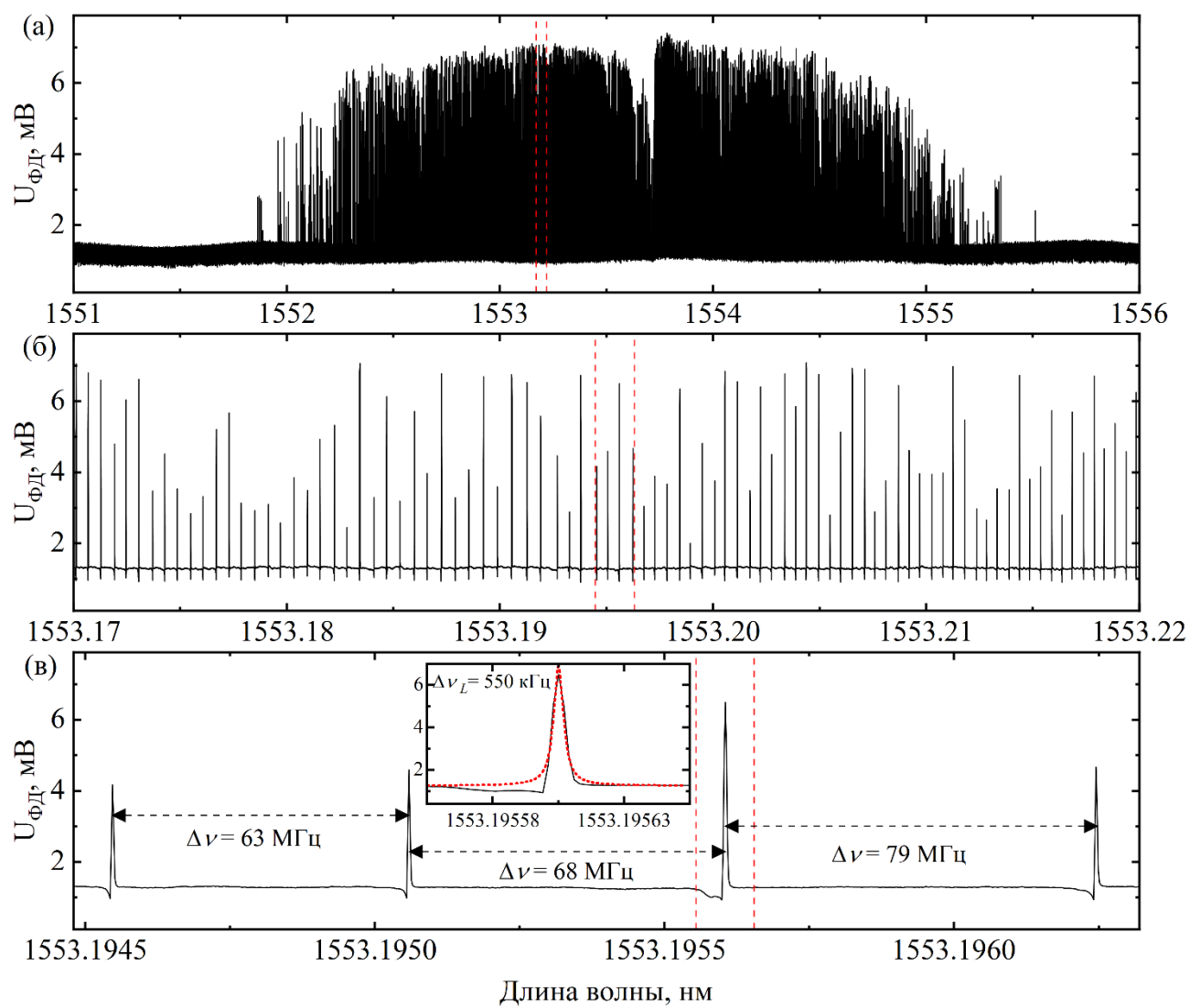


Рис. 3.

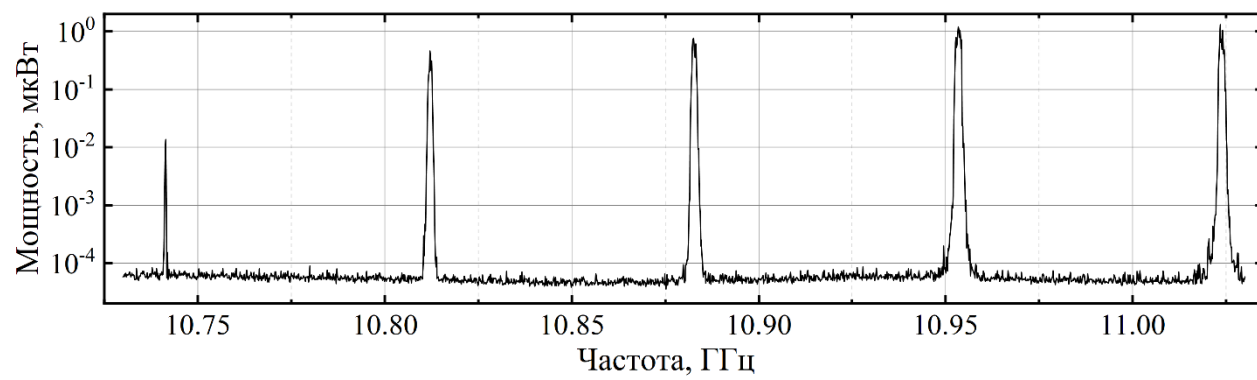


Рис. 4.