

КОМПАКТНЫЙ ГЕНЕРАТОР ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ ГРЕБЕНКИ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ И ВЫСОКОДОБОТНОГО ОПТИЧЕСКОГО МИКРОРЕЗОНАТОРА

Д. Д. Ружницкая^а, А. К. Воробьев^а, Ф. В. Булыгин^б, А. Ю. Кузин^б, К. Н. Миньков^{а*}

^а Российский квантовый центр
121205, Москва, Россия

^б Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы
119361, Москва, Россия

Поступила в редакцию 28 февраля 2023 г.,
после переработки 28 февраля 2023 г.
Принята к публикации 2 марта 2023 г.

Оптические частотные гребенки являются уникальным инструментом для фундаментальной метрологии, спектроскопии, широкого спектра прикладных задач. Перспективной платформой для генерации когерентных частотных гребенок служат высокодобо́тные микрорезонаторы. В работе предложен подход, основанный на использовании хорошо известного в радиофизике эффекта затягивания, позволяющего создать компактный коммерчески доступный источник оптической гребенки и микроволнового излучения на основе компактного лазерного диода с распределенной обратной связью с малой выходной мощностью 6 мВт и микрорезонатора на основе фторида магния с добротностью 10^9 . Продемонстрированы различные режимы генерации оптических частотных гребенок, соответствующие разному количеству генерируемых солитонов при мощности накачки 6 мВт на длине волны 1550 нм, а также спектрально чистое микроволновое излучение на частоте 12.94 ГГц.

DOI: 10.31857/S0044451023060032

EDN: DEAKTR

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы оптические частотные гребенки (ОЧГ) стали важным инструментом научных исследований и основой множества востребованных устройств, созданных на принципах фотоники и радиофотоники. Долгое время для их генерации использовались лазеры с синхронизацией мод [1], что зачастую ограничивало область применения частотных гребенок научной лабораторией. Важным прорывом оказалось обнаруженная возможность использовать для генерации таких сигналов ультракомпактные оптические микрорезонаторы (МШГ) [2]. Маленький размер и высокая плотность оптического поля за счет высокой добротности и наличия области свободной диспер-

сии (ОСД) от единиц до сотен ГГц позволяет использовать микрорезонаторы для компактной интеграции ОЧГ [3]. Более того, был разработан метод генерации когерентных частотных гребенок в виде последовательности диссипативных солитонов [2, 4]. Такие ОЧГ обладают уникальным свойством: они имеют фиксированное расстояние между всеми линиями (за счет фазовой синхронизации всех линий между собой) [5, 6]. К настоящему времени продемонстрирован ряд важных применений на основе микрорезонаторных ОЧГ в области двухгребенчатой спектроскопии [7], систем связи [8, 9], когерентных ЛИДАРов [10], калибровки астрофизических спектрометров [11, 12], сверхмалошумящей микроволновой генерации [5, 6] и фотонных вычислений [13].

В последнее время активно развивается подход к генерации ОЧГ в высокодобо́тных микрорезонаторах, основанный на применении эффекта затягивания [4, 14–16]. Этот эффект основан на создании частично-селективной оптической обратной связи между микрорезонатором и лазерным диодом,

* E-mail: k.minkov@rqc.ru

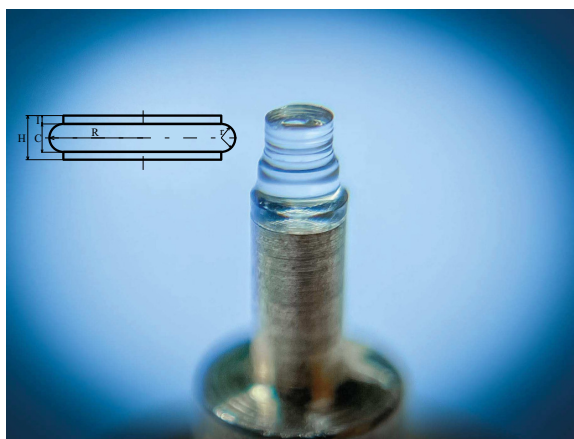


Рис. 1. Фотография микрорезонатора из MgF_2 . На вставке схематично представлена геометрия МШГ-микрорезонатора: H — высота резонатора, R — радиус резонатора, I — отступ от края, r — радиус закругления резонатора, C — хорда

которая позволяет значительно уменьшить спектральную ширину линии генерации лазерного диода и, как следствие, фазовый шум лазерного излучения. Как правило, микрорезонаторы для генерации ОЧГ изготавливаются двумя методами: литографическим [17] или путем механической обработки кристаллов [18]. Интегральные микрорезонаторы обладают высокой технологичностью процесса производства, а также малым размером, что приводит к снижению эффективного размера моды и более яркому проявлению нелинейных процессов. Однако такие резонаторы уступают в добротности кристаллическим, значение добротности в которых достигает $Q = 10^{11}$ [19], а также имеют широкий диапазон прозрачности от ультрафиолетового до дальнего инфракрасного диапазона [20–22]. Поэтому именно использование кристаллических микрорезонаторов позволяет снизить требования к источнику накачки и сделать процесс генерации ОЧГ более доступным. На рис. 1 показан типичный вид кристаллического микрорезонатора из фторида магния, полученный методом алмазного точения [18] с основным набором геометрических параметров.

Применение кристаллических микрорезонаторов с модами шепчущей галереи (микрорезонатор-МШГ) было успешно продемонстрировано в исследованиях [4, 5, 14, 15, 23–25] для стабилизации лазерного излучения и генерации ОЧГ. Так, в работах [14–16, 25] было показано, что стабилизировать излучение лазера и получить ОЧГ возможно при мощностях порядка 100 мВт. Поэтому всегда использовали относительно мощные 100 мВт одно-

частотные и многочастотные лазерные диоды для накачки микрорезонаторов и получения ОЧГ.

Однако, как показано в аналитической теории в работе [14], эффекты затягивания и генерации ОЧГ возможны и при мощностях порядка десятков мВт в зависимости от добротности микрорезонатора. Определяющими параметрами являются диапазон затягивания (1) и ширина затягивания (2) [14]:

$$\frac{\Delta\omega_{lock}}{\omega} = \sqrt{1 + \alpha_g^2 \frac{\Gamma_m}{Q_d}}, \quad (1)$$

$$\frac{\delta\omega}{\delta\omega_{free}} = \frac{(Q_d)^2}{(Q_m)^2} \frac{1}{16\Gamma_m^2 (1 + \alpha_g^2)}, \quad (2)$$

где Γ_m — усиление МШГ-резонатора, Q_d — добротность резонатора лазера, Q_m — добротность МШГ-резонатора, α_g — коэффициент усиления, $\delta\omega/\delta\omega_{free}$ — ширина линии, $\Delta\omega_{lock}$ — диапазон затягивания. Из формул (1) и (2) видно, что ключевым фактором для появления эффекта затягивания является добротность МШГ-резонатора. Так, применение высокодобротного кристаллического резонатора способно показать сужение линии в 1000 раз, что в свою очередь снижает порог мощности, необходимой для генерации ОЧГ, и, как следствие, становится возможным использование лазерных диодов с малой выходной мощностью для генерации ОЧГ в режиме затягивания.

В настоящей работе продемонстрирована генерация оптической частотной гребенки в микрорезонаторе МШГ на основе фторида магния. Для генерации ОЧГ в качестве источника накачки использовался компактный лазерный диод с распределенной обратной связью и максимальной выходной мощностью 20 мВт, стабилизированный тем же микрорезонатором в режиме затягивания. Впервые генерация ОЧГ была получена при мощности 6 мВт на длине волны 1550 нм при помощи коммерчески доступного диода в оптических кристаллических микрорезонаторах с МШГ. Кроме того, в работе продемонстрирована генерация оптических гребенок в микрорезонаторе в режиме затягивания моды и генерация ОЧГ с 12 ОСД, 4 ОСД, и 1 ОСД, а также микроволновое излучение на частотах 155.28 ГГц, 51.76 ГГц и 12.94 ГГц, соответственно. Подобные спектры ОЧГ могут применяться для спектроскопии в случае, когда оптическая частотная гребенка представлена мощными отдельными линиями [7, 26, 27]. Представленный подход позволяет существенно снизить требования к источнику накачки, ввиду использования компактного и доступного лазерного диода с малой выходной мощностью. Также предложенная

схема обеспечивает миниатюризацию и удешевление системы генерации ОЧГ за счет применения микрорезонатора МШГ на основе фторида магния для стабилизации диода и генерации ОЧГ без введения дополнительных элементов в систему.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема эксперимента показана на рис. 2. Высокودобротный микрорезонатор с модами шепчущей галереи (МШГ), используемый в эксперименте, был изготовлен из фторида магния методом точечного алмазного точения [18]. Диаметр микрорезонатора составлял 5.1 мм, толщина 1 мм, область свободной дисперсии 12.94 ГГц. Измеренная методом звона добротность микрорезонатора в критической связи составила $Q = 10^9$.

Для генерации ОЧГ в эксперименте был выбран лазерный диод с распределенной обратной связью и максимальной выходной мощностью 20 мВт. Максимальный ток, подаваемый с источника питания, составлял 60 мА, а центральная длина волны равнялась 1549.6 нм. Для возбуждения МШГ была использована классическая схема с элементом связи (ЭС) в качестве прямоугольной стеклянной призмы БК-7. Излучение лазерного диода коллимировалось на внутреннюю поверхность под углом полного внутреннего отражения [28]. В точке фокусировки образуется выпадающее поле которое необходимо для связи с микрорезонатором [22]. Расстояние от микрорезонатора до ЛД равно двойному фокусному расстоянию фокусирующей линзы (Л), установленной между ЛД и МШГ, и составляет 9 мм. Зазор между резонатором и ЭС контролировался при помощи пьезоподачи. Эффективность связи с микрорезонатором в эксперименте составила 30 %, т. е. максимальная мощность внутри микрорезонатора при максимальной мощности лазерного диода (20 мВт) составила 6 мВт. Отметим, что эффективность связи может быть значительно улучшена путем использования просветленной призмы на рабочей длине волны.

Вышедшее из резонатора излучение делилась на две части при помощи делителя луча (ДЛ): одна проходила на фотодетектор (ФД) Thorlabs PDA50B2 с полосой пропускания 510 кГц и записывалась при помощи осциллографа (ОС) Keysight InfiniiVision MSO-X 4154A с полосой пропускания до 1.5 ГГц, другая поступала на быстрый фотодетектор (БФД) (Newport 1414, полоса пропускания 25 ГГц) и с помощью второго делителя

передавалась на оптический анализатор спектра (ОСА) Yokogawa AQ6370D с диапазоном измерений от 600 до 1700 нм и разрешением 0.02 нм и электронный спектроанализатор (ЕСА) R&S FSW26 с диапазоном измерений от 2 Гц до 26 ГГц.

ОЧГ в режиме затягивания генерировались следующим образом. На первом этапе эксперимента мониторился спектр мод микрорезонатора при медленной перестройке (50 Гц) тока лазерного диода внешним генератором для определения соответствующих частот мод. Затем процесс затягивания генерации оптической гребенки осуществлялся на выбранной моде путем синхронизации ее частоты с частотой лазерного диода. На рис. 3 показана характерная резонансная мода микрорезонатора, полученная в режиме затягивания с характерными ступенчатыми состояниями соответствующими различным ОЧГ состояниям [4, 29] при медленной перестройке лазерного диода в окрестностях резонансной моды. Область (а) соответствует свободному излучению диода вне резонансной моды. Далее, по мере приближении частоты диода к частоте резонатора начинает наблюдаться эффект затягивания. Этот процесс сопровождается резкими обрывами в окрестностях резонансной моды, который можно наблюдать на рис. 3. Сама резонансная мода становится прямоугольной. Суммарная ширина затягивания характеризуется уравнением (1) и в нашем случае составляет порядка 1 ГГц. Внутри затянутой моды есть область (б), которая представляет собой генерацию ОЧГ в режиме затягивания, где нет образования солитонных состояний [28]. Область (в на рис. 3 — проявление тепловой нелинейности с последующим переходом в низкошумящее солитонное состояние (ступеньки). После режима тепловой нелинейности наблюдался переход в режим со ступеньками где начинают формироваться солитонные гребенки и солитонные кристаллы [29]. После обнаружения всех режимов генерации ОЧГ внешняя перестройка частоты отключалась. Затем осуществлялся переход в режим затягивания путем изменения тока лазерного диода.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В проведенном эксперименте исследованы оптические спектры в зависимости от изменения тока питания лазерного диода и выявлены различные типы спектров в зависимости от области затягивания в которой находится лазерный диод (рис. 3). На рис. 4 представлены полученные ОЧГ в режиме затягива-

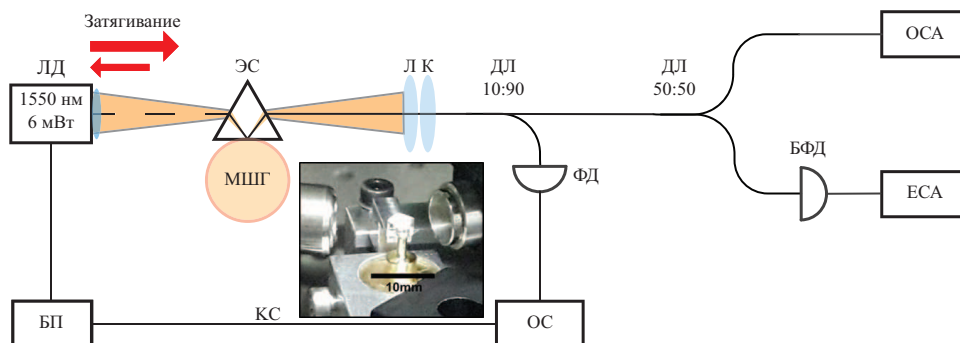


Рис. 2. Схема экспериментальной установки. ЛД — лазерный диод с распределенной обратной связью, БП — блок питания ЛД, ЭС — элемент связи, МШГ — МШГ-микрорезонатор, Л — линза, К — коллиматор, ДЛ — делитель луча, ФД — фотодетектор, ОС — осциллограф, КС — канал синхронизации, БФД — быстрый фотодетектор, ОСА — оптический анализатор спектра, ЕСА — анализатор спектра радиодиапазона. На вставке показано фото установки

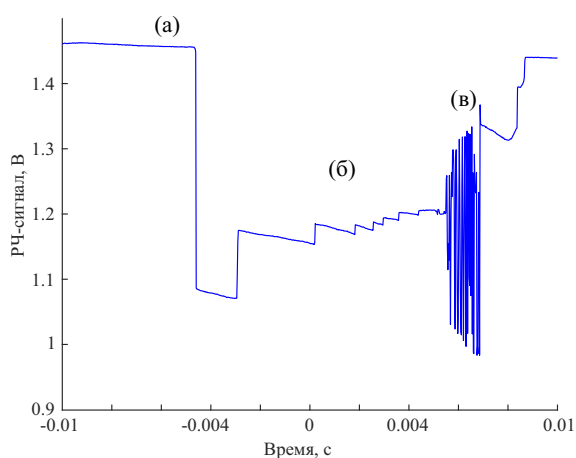


Рис. 3. Отклик резонансной моды на осциллографе со ступенчатым переходом в солитонное состояние

ния при средней мощности внутри микрорезонатора 6 мВт. Рисунок 4 а характеризует шумную гребенку с интервалом между линиями 12 ОСД полученный в области затыгивания (б) на рис. 3. Данный спектр гребенки характеризуется большей мощностью линий гребенки подробно описанному в работе [30]. Рисунок 4 б, в — это области затыгивания (в) на рис. 3, характеризующие генерацию солитонных кристаллов с интервалами 4 ОСД и 1 ОСД, соответственно. Кроме того, получено многосолитонное состояние, представленное на рис. 4 г [4].

На рис. 4 показаны различные оптические спектры гребенок в разных областях затыгивания и при разных отстройках лазерного диода от моды микрорезонатора. Эти спектры характеризуются различными формами огибающей, а также мощностью линий гребенки. Относительно более мощные линии гребенки возникают, когда частота генерации при-

ближается к области тепловой нелинейности [4]. В момент возникновения тепловой нелинейности мы видим мощные линии, затем происходит настройка на солитонные состояния, которые меньше по мощности.

Солитонные состояния повторно наблюдались при сканировании тока диода в прямом и обратном направлениях, при стабилизации внешних условий, таких как уровень связи между элементом связи и резонатором, температурной стабильности, в отсутствие акустических помех спектры повторяемы при включении и выключении лазера [31].

Также дополнительно была измерена микроволновая частота биений линий гребенки путем гетеродинирования оптического сигнала на быстром фотодетекторе (25 ГГц). На рис. 5. показан сигнал биений линий гребенки, снятый с многосолитонного спектра (рис. 4 г). Данное состояние характеризуется интервалом между линиями гребенки равным 1 ОСД или частоте 12.94 ГГц. Ширина линии полученного излучения, определенная при помощи аппроксимации функцией Лоренца по крыльям линии, составила 2.6 кГц, что подтверждает высокую когерентность и маленькие шумы линий гребенки, а также СВЧ-сигнала. Подобные СВЧ-сигналы также могут наблюдаться на частотах 155.28 ГГц и 51.76 ГГц соответствующих спектрам гребенки на рис. 4 а, б, но из-за ограниченной полосы высокочастотного детектора (Newport 1414, полоса пропускания 25 ГГц) мы не смогли напрямую их наблюдать.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование впервые показало, что мощность накачки 6 мВт для высокодобротного кристаллического резонатора является доста-

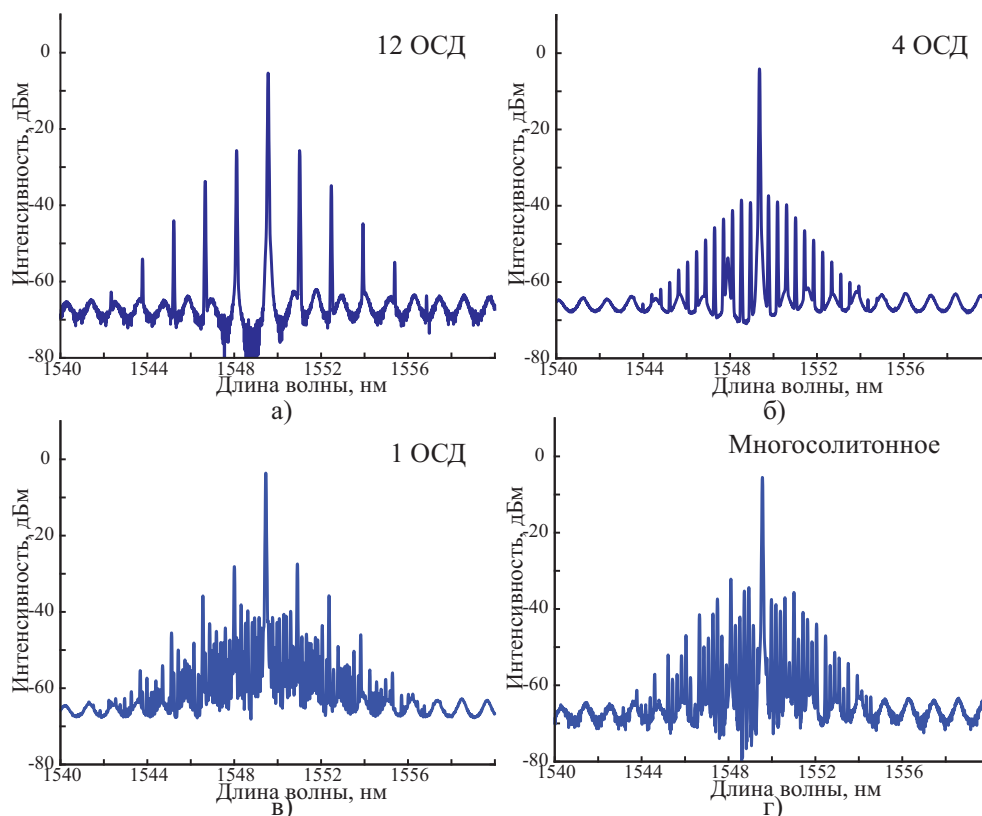


Рис. 4. Спектры ОЧГ в режиме затягивания частоты лазерного диода соединенного с МШГ-микрорезонатором из фторида магния: *а* — шумная гребенка с интервалом 12 ОСД, *б*, *в* — спектры с интервалом 4 ОСД и 1 ОСД в области тепловой нелинейности соответственно, *г* — многосолитонное состояние. Детали описания приведены в тексте

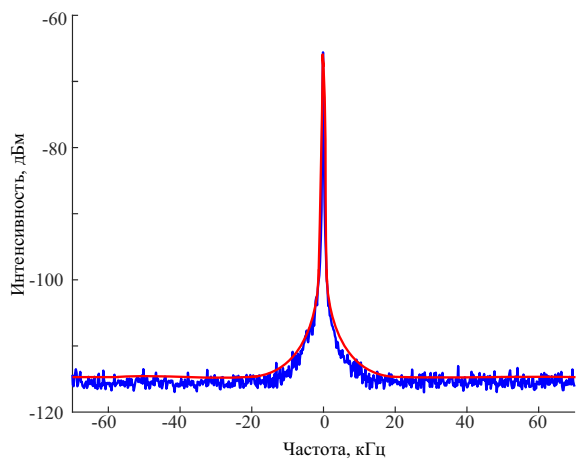


Рис. 5. Сигнал микроволнового излучения (синяя кривая) на частоте 12.94 ГГц. Красная кривая — аппроксимация функцией Лоренца

точной для генерации оптических частотных гребенок с различными оптическими спектрами: 12 ОСД (155.28 ГГц), 4 ОСД (51.76 ГГц), 1 ОСД (12.94 ГГц). При этом источником накачки является общедо-

ступный маломощный лазерный диод с распределенной обратной связью. Кроме того, в зависимости от сгенерированного спектра, возможно получить соответствующую СВЧ-частоту от биений линий гребенки (155.28 ГГц, 51.76 ГГц, 12.94 ГГц, соответственно). Полученные результаты указывают на то, что солитонные оптические частотные гребенки, полученные на основе микрорезонаторов, могут быть эффективно использованы для ряда сенсорных, телекоммуникационных, метрологических приложений, а также для создания широкого спектра микроволновых импульсов. Полученные гребенки имеют фазовую синхронизацию между всеми линиями, создавая когерентную периодическую последовательность импульсов во всей временной области, обладают беспрецедентно низким уровнем фазовых шумов. Представленные результаты могут сделать существенный вклад в развитие ряда приложений таких как оптическая связь, спектроскопия, синтез частот и микроволновое излучение, за счет удешевления процесса генерации солитонных оптических частотных гребенок.

Благодарности. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ВНИИОФИ (скр.vniiofi.ru) и ЦКП «Визуализации высокого разрешения» Сколтех (www.skoltech.ru).

Финансирование. Работа поддержана Российским научным фондом (проект N 21-72-00132).

ЛИТЕРАТУРА

1. H. Zang, D. Y. Tang, L. M. Zhao, and H. Y. Tam, *Science*. **33**, 2317 (2008).
2. T. J. Kippenberg, A. L. Gaeta, M. Lipson, and M. L. Gorodetsky, *Science*. **361**, eaan8083 (2018).
3. T. Fortier, and E. Baumann, *Commun. Phys.* **2**, 153 (2019).
4. T. Herr, V. Brash, J. Jost et. al., *Nat. Photon.* **8**, 145 (2014).
5. W. Liang, D. Eliyahu, V. Pchenko et. al., *Nat Commun.* **6**, 7957 (2015).
6. J. Liu, E. Lucas, A. S. Raja et. al., *Nat. Commun.* **6**, 7957 (2020).
7. M-G. Suh, Q-F. Yang, K. Y. Yang, X. Yi, and K. J. Vahala, *Sci. Adv.* **354**, 600 (2016)
8. P. Marin-Palomo, J. Kemal, M. Karpov et. al., *Nature*. **546**, 7957 (2017).
9. A. Fülöp, M. Mazur, A. Lorences-Riesgo et. al., *Nat. Commun.* **9**, 1598 (2018).
10. J. Riemensberger, A. Lukashchuk, M. Karpov et. al., *Nature*. **581**, 164 (2020).
11. E. Obrzud, M. Rainer, A. Harutyunyan et. al., *Nat. Photon.* **13**, 31 (2019).
12. M-G. Suh, X. Yi, Y. H. Lai et. al., *Nat. Photon.* **13**, 25 (2019).
13. J. Feldmann, N. Youngblood, M. Karpov et. al., *Nature*. **591**, E13 (2021).
14. N. M. Kondratiev, V. E. Lobanov, A. V. Cherenkov et. al., *Opt. Express*. **25**, 28167 (2017).
15. А. Е. Шитков, А. С. Волошин, И. К. Горелов и др., *ЖЭТФ* **161**, 683 (2022) [A. E. Shitikov, A. S. Voloshin, I. K. Gorelov et. al., *JETP* **134**, 583 (2022).]
16. T. J. Kippenberg, R. Holzwarth, and S. A. Diddams, *Science*. **332**, 555 (2011).
17. V. Brasch, M. Geiselmann, T. Herr et. al., *Science*. **351**, 357 (2016).
18. К. Н. Миньков, Г. В. Лихачев, Н. Г. Павлов и др., *Оптический журнал* **86**, 84 (2021) [K. N. Min'kov, G. V. Likhachev, N. G. Pavlov et. al., *J. Opt. Technol.* **88**, 348 (2021).]
19. A. A. Savchenkov, A. B. Matsko, V. S. Pchenko, and L. Maleki, *Opt. Express*. **15**, 6768 (2007).
20. C. Lecaplain, C. Javerzac-Galy, M. Gorodetsky et. al., *Nat. Commun.* **7**, 13383 (2016).
21. A. A. Savchenkov, S-W. Chiow, M. Ghasemkhani et. al., *Opt. Lett.* **44**, 4175 (2019).
22. М. Л. Городецкий, *Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью*, Физматлит, Москва (2011).
23. W. Liang, A. B. Matsko, A. A. Savchenkov, V. S. Pchenko, D. Seidel, and L. Maleki, *Generation of Kerr combs in MgF₂ and CaF₂ microresonators*, IEEE, San Francisco (2011).
24. J. D. Jost, E. Lucas, T. Herr et. al., *Opt. Lett.* **40**, 4723 (2015).
25. A. E. Shitikov, V. E. Lobanov, N. M. Kondratiev et. al., *Phys. Rev. Appl.* **15**, 064066 (2021).
26. N. G. Pavlov, G. V. Lihachev, S. Koptyaev et. al., *Opt. Lett.* **42**, 514 (2017).
27. S. B. Papp, K. Beha, P. Del'Haye et. al., *Optica* **1**, 10 (2014).
28. N. G. Pavlov, S. Koptyaev, G. V. Lihachev et. al., *Nat. Photon.* **12**, 694 (2018).
29. M. Karpov, M. H. P. Pfeiffer, H. Guo et. al., *Nat. Phys.* **15**, 1071 (2019).
30. N. Kondratiev, V. Lobanov, N. Dmitriev et. al., *ArXiv* 2209.03707.
31. R. R. Galiev, N. G. Pavlov, N. M. Kondratiev et. al., *Opt. Express*. **26**, 30509 (2018).