

ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ ВОЛС

Получение частотных гребенок в генераторах на WGM в микросферах для телекоммуникационных приложений*

Я.Браунфельдс, Р.Мурниекс, Т.Салгалс, И.Брис, Т.Шарашидзе, И.Ляшук, А.Островскис, С.Сполитис, Я.Алнис, Ю.Поринс, В.Бобровс

Рассмотрены процесс генерации оптической частотной гребенки (ОЧГ), основные параметры микрорезонаторов, такие как межмодовое расстояние (FSR) и добротность (Q-фактор), параметры известных генераторов ОЧГ и генерируемых ими гребенок, а также применение ОЧГ для оптической передачи данных. Получена ОЧГ с помощью устройства на основе конического волокна (тейпера) и микросферы из SiO_2 . Генерируемая гребенка имеет частотный интервал 257 ТГц, что соответствует 2 нм по длине волны. В процессе изготовления конического волокна из волокна SMF28 использовался сигнал пропускания для контроля процесса вытяжки тейпера. Пропускание готового конического волокна составило ~96%. Микросферический резонатор на модах шепчущей галереи (WGMR) с добротностью не менее 2×10^7 был изготовлен из волокна с сердцевиной большей толщины, чем у стандартного одномодового волокна. Для будущих экспериментов разработан генератор частотной гребенки, состоящий из расположенных в свободном пространстве линз, призмы и микросферы, и исследована зависимость его добротности от расстояния между призмой и микросферой.

Ключевые слова: оптическая частотная гребенка (ОЧГ), межмодовый интервал, добротность, коническое волокно, микросферический SiO_2 -резонатор, мода шепчущей галереи.

1. Введение

Оптические частотные гребенки (ОЧГ) совершили революцию в таких областях, как оптические стандарты частоты, оптическая метрология. Полученные на основе резонаторов керровские частотные гребенки способны заменить дорогостоящие массивы из многих лазеров в пассивных оптических сетях (PON), использующих мультиплексирование с разделением каналов по длине волны (WDM-PON), что обеспечивает эффективность получения как спектральных, так и мощностных характеристик.

С момента появления генераторы ОЧГ нашли применение в оптических часах, генераторах фотонов радиочастотного диапазона с рекордно чистым спектром, в микроволновых системах с низким уровнем фазового шума, для точной привязки частоты, когерентной оптической связи и др. [1, 2]. Известно, что высокодобротные оптические резонаторы с модой шепчущей галереи (WGMR) усиливают нелинейно-оптические эффекты третьего порядка

за счет концентрации света в пределах малого объема. Это позволяет генерировать ОЧГ в условиях преимущественно аномальной дисперсии групповой скорости (ДГС) и четырехволнового смешения (ЧВС) [3]. Как следствие, была продемонстрирована генерация ОЧГ при взаимодействии излучения накачки непрерывного лазера с модами нелинейного микрорезонатора [4].

Резонаторы WGRM классифицируются в основном по способу изготовления. Существующие объемные резонаторы далее делятся на две группы: кристаллические микродисковые резонаторы, изготавливаемые путем полировки цилиндров из CaF_2 или MgF_2 и обеспечивающие добротность порядка 10^9 – 10^{11} [5], а также стандартные телекоммуникационные микросферы, для изготовления которых конец волокна оплачивается с помощью источника тепла, например CO_2 -лазера или газовой горелки. Такие микрорезонаторы обеспечивают добротность 10^6 – 10^9 (см. табл.1). Другим распространенным типом являются интегральные микрорезонаторы, изготавливаемые с применением методов литографии из волноводов, материалы которых совместимы с кремниевой технологией (Si , Si_3N_4 , и т. п.); их добротность составляет $\sim 10^6$ [6] (см. табл.2).

Генераторы частотных гребенок на основе любого из названных типов WGMR обладают высокой частотной стабильностью, при этом значительно проще конструктивно (состоят из одного непрерывного лазера накачки и микрорезонатора) и имеют меньшие размеры (диаметр резонатора – от микрометра до миллиметра), чем обычные генераторы гребенок [7, 8]. Широкополосная природа параметрического усиления в WGMR обеспечивает возможность генерации ОЧГ с центром на длине волны 1550 нм и расстоянием между линиями порядка десятков или сотен гигагерц в диапазоне более 500 нм (70 ТГц) [9], или даже превышающем октаву [10]. Это соответствует полосам S, C, L и U оптической связи [11, 12]. По стабиль-

* Перевод с англ. В.Л.Дербова

J. Braunfelds, R. Murnieks, T. Sharashidze, A. Ostrovskis, S. Spolitis, J. Porins, V. Bobrovs. Institute of Telecommunications, Riga Technical University, Latvia, Riga, Āzenes street 12, LV;
e-mail: vjaceslavs.bobrovs@rtu.lv

T. Salgals, I. Lyashuk. Institute of Telecommunications, Riga Technical University, Latvia, Riga, Āzenes street 12, LV; AFFOC Solutions Ltd., Latvia, Jelgavas nov., Kalnciems, Jaunības street 2-58, LV-3016;
e-mail: Mareks.Parfjonovs@affocs.eu

I. Brice, J. Alnis. Institute of Atomic Physics and Spectroscopy, University of Latvia, Latvia, Riga, Jelgavas street 3, LV-1004;
e-mail: asi@lu.lv

ности и энергоэффективности [13] ОЧГ на микрорезонаторах – идеальный кандидат на замену дорогостоящим массивам из множества лазеров, обычно применяемым в пассивных оптических сетях при мультиплексировании с разделением каналов по длине волны [14]. Такая замена возможна, поскольку источники оптических гребенок на основе микрорезонаторов генерируют целую сетку равноотстоящих оптических реперов, необходимых для поддержания сети WDM-PON [2].

Керровские гребенки применялись в нескольких экспериментах по передаче данных с использованием интегральных WGM-резонаторов. Так, при использовании резонатора на основе Si_3N_4 была получена агрегированная скорость передачи данных 170.8 Гбит/с при модуляции включением-выключением с возвращением к нулю (return-to-zero on-off keying, RZ-ООК) [15], 400 Гбит/с при использовании первичной гребенки [16], 19.7 Тбит/с при передаче на расстояние более 75 км с помощью солитонной керровской частотной гребенки [17], а также 34.7 Тбит/с при использовании усовершенствованного формата модуляции [18]. Были выполнены также эксперименты по передаче данных с использованием кристаллического резонатора из MgF_2 [19]. Однако передачу данных на основе частотных гребенок, полученных в различных объемных микрорезонаторах, особенно на микросферах из волнока, еще предстоит реализовать.

В настоящей работе в разд.2 описаны принципы генерации частотных гребенок и основные характеристики ОЧГ. Разд.3 посвящен общему обзору использования генераторов ОЧГ в телекоммуникациях. В разд.4 представлены дальнейшие разработки и экспериментальные результаты. Последний раздел содержит выводы, показывающие, что частотные гребенки, генерируемые в объемных WGM, могут заменить массивы из лазеров для передачи данных в WDM-PON.

2. Процесс генерации оптической частотной гребенки

Генерация ОЧГ, впервые полученная в WGM [4], обусловлена каскадным ЧВС за счет керровской нелинейности в оптических материалах. Поэтому керровские частотные гребенки можно получать в любом резонаторе из оптического материала, обладающего этой нелинейностью. Генерация ОЧГ экспериментально продемонстрирована в CaF_2 [8], MgF_2 [7], Si_3N_4 [19], а также в кольцевых волоконных резонаторах [20]. Формирование ОЧГ в микросферах численно моделируется на основе уравнения Луджиато–Лефевра с использованием метода расщепления с преобразованием Фурье (split-step Fourier method, SSFM) [21, 22].

При мощности накачки, превышающей порог параметрической генерации в высокодобротном микрорезонаторе, первые линии гребенки возникают на стоковых и антистоковых частотах, смещенных от частоты накачки на кратные интервалы, обусловленные ЧВС. Дальнейшее увеличение мощности накачки инициирует каскадное ЧВС, которое создает боковые компоненты высших порядков, образующие первичную гребенку. Первоначально наблюдаемое расстояние между линиями Δ воспроизводится для вновь возникающих линий благодаря сохранению энергии при параметрических процессах. На следующем шаге за счет вырожденного и невырожденного ЧВС вторичные линии генерируют субгребенки с новым резо-

нансным частотным сдвигом δ относительно первичных линий, который в общем случае отличен от Δ , и т. д. В результате субгребенки перекрываются и образуют лишенный промежутков спектр частотной гребенки, в котором частотный интервал между двумя последовательными соседними линиями совпадает с межмодовым расстоянием резонатора (FSR) [9, 23]. Сплошная частотная гребенка имеет один главный ограничивающий фактор – мультиплетные линии, однако существует несколько методов уменьшить их образование [13].

Генератор частотной гребенки должен обеспечивать регулировку расстояния между ее линиями. Расстояние между линиями ОЧГ обычно равно FSR [1]. Межмодовое расстояние WGM-резонатора (интервал длин волн между двумя резонансами) можно оценить по формуле

$$\text{FSR}_{\text{WGM}} = \frac{c}{2\pi a n_0}, \quad (1)$$

где a – радиус резонатора, а n_0 – показатель преломления на частоте излучения накачки [24].

Расстояние между линиями гребенки можно настраивать на целое число межмодовых расстояний двумя способами: путем изменения условий связи [7, 25] или частоты излучения накачки – другими словами, отстройки частоты лазера накачки от собственной частоты резонатора [1, 25]. Для лазера, частота которого больше частоты резонанса WGM, величина указанной отстройки $\Delta = f_{\text{pump}} - f_{\text{cavity}}$ может быть положительной. В этом случае говорят об отстройке лазера в синюю сторону, в противном случае – в красную. Возбуждение с отстройкой в синюю сторону термически устойчиво при комнатной температуре. Напротив, возбуждение с отстройкой в красную сторону термически неустойчиво, но именно оно требуется для формирования солитонов [26]. Изменение условий связи меняет расстояние между линиями гребенки и нагруженную добротность (при снижении нагрузки резонатора добротность возрастает). Это, в свою очередь, влияет на чистоту спектра частотной гребенки. Добротность является мерой остроты (ширины линии) резонанса относительно его центральной частоты:

$$Q_i = \frac{\lambda_{\text{res}}}{\text{FWHM}}, \quad (2)$$

где λ_{res} – резонансная длина волны; FWHM – полная ширина резонанса на уровне половины максимума [27, 28].

Эффективность процесса генерации керровской гребенки по мощности можно повысить путем должного выбора материала микрорезонатора. Для генерации ОЧГ предпочтительна слабая аномальная дисперсия. Полный профиль дисперсии зависит от материала, формы и размера резонатора. Материальная дисперсия резонаторов из SiO_2 , Al_2O_3 , MgF_2 , CaF_2 и BaF_2 и полная дисперсия резонаторов из MgF_2 разного размера рассчитаны и приведены в работе [3].

Необходимо гарантировать долговременную стабильность ОЧГ, чтобы спектральная форма линий и расстояние между ними оставались постоянными. Реализовать долговременную стабильность можно путем привязки частоты лазера к частоте резонатора. Наиболее популярна схема Паунда–Древера–Холла, использованная в [29, 30]. Существуют и другие методы, например привязка частоты лазера к резонансу с использованием встречного излу-

чения, возникающего из-за внутреннего рэлеевского рассеяния назад (self-injection locking) [7, 8].

3. Генераторы частотных гребенок и их применение в телекоммуникационных системах

ОЧГ находят огромное число приложений в телекоммуникационных системах. Так, беспроводные оптические системы передачи данных на короткие расстояния, представленные в работе [31], достигают скоростей 228 Гб/с на расстоянии 80 см в свободном пространстве. В качестве еще одного примера приведем использование ОЧГ для генерации микроволновых сигналов [32]. Другой областью возможного применения ОЧГ являются волоконно-оптические системы передачи. Здесь ведутся интенсивные работы по реализации источников ОЧГ в чип-масштабах для передачи данных. Достигнуты скорости до 50 Тбит/с при параллельной передаче массивов данных с WDM на расстояние 75 км [33]. Еще одно потенциальное приложение керровских гребенок в оптических системах предложено в [34], где генерация множества керровских гребенок (ведомых) получена от разных линий другой керровской гребенки (ведущей), расположенной на расстоянии 50 км. Однако источники гребенок на объемных резонаторах для передачи данных [19] пока не привлекли большого внимания, поэтому демонстрация передачи данных с использованием ОЧГ, генерируемых в объемных резонаторах различных типов, особенно микросферах из волокна, еще предстоит.

Широко обсуждаемые в литературе генераторы частотных гребенок на основе микрорезонаторов с WGM (рис.1) обычно включают в себя непрерывный лазер накачки (НЛН) и поляризационный контроллер. После контроллера свет усиливается эрбиевым волоконным усилителем (ЭВУ) и вводится в нелинейный резонатор через призмы, конические волокна или волокна с наклонно отполированным торцом. Для фильтрации шума усилителя перед вводом в резонатор излучение пропускается через полосовой фильтр (ПФ). Затем с помощью тех же призм или волокон свет из нелинейного резонатора выводится и измеряется оптическим спектроанализатором (ОСА) и направляется на рpи-фотодиод (ФД) для последующего анализа частотной гребенки во времени с помощью цифро-

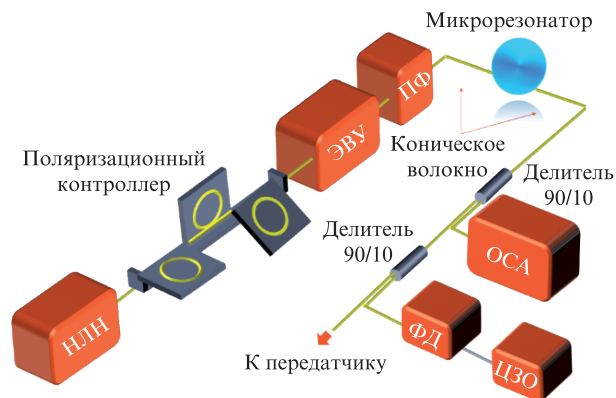


Рис.1. Типичная установка для генерации частотной гребенки на WGM (вместо конических волокон может использоваться призма); НЛН – непрерывный лазер накачки; ЭВУ – эрбиевый волоконный усилитель; ПФ – полосовой фильтр; ОСА – оптический спектроанализатор; ФД – рpи-фотодиод; ЦЗО – цифровой запоминающий осциллограф.

вого запоминающего осциллографа (ЦЗО) или дальнейшего использования в передатчике.

Схемы, соответствующие этой обобщенной модели, применяются, например, для накачки резонаторов с целью генерации частотных гребенок. Параметры проведенных ранее экспериментов и микрорезонаторов представлены в табл.1 и 2.

Известно несколько экспериментальных работ по передаче данных. В одном из первых экспериментов [15] керровская гребенка генерировалась в резонаторе из нитрида кремния и модулировалась RZ-ООК-сигналом со скоростью до 42.7 Гб/с. Передача данных считается безошибочной, если используются алгоритмы прямого исправления ошибок (FEC). В более поздней работе [19] было показано, что первичная решетка, генерируемая в кристаллическом дисковом резонаторе из MgF₂, обеспечивает высококачественные несущие, которые хорошо подходят для когерентной передачи данных, т. к. устраняется проблема мультиплетных линий. Скорость передачи данных до 432 Гб/с достигается в формате квадратурной модуляции со сдвигом по фазе (QPSK) и 16-позиционной квадратурной амплитудной модуляции (16-QAM). В работе [16] достигнута скорость 392 Гб/с с использованием гребенки, генерируемой в Si₃N₄, и тех же форматов модуляции, что и в [19].

Табл.1. Объемные микрорезонаторы и численные модели, их параметры и генерируемые частотные гребенки.

Параметр	Типы резонаторов			
	CaF ₂ [1, 24]	MgF ₂ [7, 8, 18, 35–38]	SiO ₂ [22, 39–44]	Германосиликатные стекла [20, 21]
	Кристаллический	Кристаллический	Микросфера\ Микростержень\ Микропузырек	Микросфера
Добротность Q_f	$(2.5-6) \times 10^9$	$(1-3) \times 10^9$	$2 \times 10^7-9.7 \times 10^8$	$1 \times 10^5-1 \times 10^7$
Радиус a (мм)	1.275–2.425	0.5–5.65	0.136–1	0.2–0.4
Межмодовое расстояние FSR (ГГц)	13.8–25	5.8–43	12.9–1000	–
Длина волны накачки λ_{pump} (нм)	1550–1560	1543–1556	1549.5–1560	1550
Мощность накачки P_{pump} (дБм)	14–17	3–28.5	4.8–24.5	20
Ширина гребенки (нм)	30–280	2–300	10–250	100–200
Расстояние между линиями гребенки (ГГц)	13.81–359	9.9–248.5	32.6–1000	–

Табл.2. Интегральные микрорезонаторы, их параметры и генерируемые частотные гребенки.

Параметр	Типы резонаторов					
	Кварц на кремниевом чипе [4, 50–52]	Si ₃ N ₄ [10, 11, 14, 26, 33, 49]	AlN [47, 48]	SiN [16, 34]	Стекло Hydex [46]	MgF ₂ [45]
	Тороидальный диск	Кольцо	Кольцо	Кольцо	Четырехпортовое микрокольцо	Фотонный пояс (photonic belt)*
Добротность Q_f	$(2-2.7) \times 10^8$	$1 \times 10^5 - 1.3 \times 10^6$	$(5-6) \times 10^5$	$(1-2) \times 10^6$	1.2×10^6	4.7×10^8
Радиус a (мм)	0.038–1	0.02–0.3	0.06	0.3	0.135	1.34
FSR (ГГц)	33–850	75–403	17–370	25–95.8	200	25.78
λ_{pump} (нм)	1548–1560	1541–1561	1550–1553.2	1548.8–1549.4	1544.2–1558.7	1561
P_{pump} (дБм)	8.8–34	21.8–34.8	27–27.8	29–34.8	17.3–18	12.8
Ширина гребенки (нм)	350–1180	200–725	200	–	100–255	~30
Расстояние между линиями гребенки (ГГц)	33–1100	17–403	370	25–95.8	32.7–6400	–

*Микрорезонатор в виде ленты, опоясывающей аксиально-симметричный стержень (прим. перев.)

Терабитная связь впервые продемонстрирована в [35] с гребенкой, генерируемой в резонаторах из SiN. Стабильность частотной гребенки обеспечивается петлей обратной связи. Реализована скорость передачи данных 1.44 Тбит/с по 20 каналам на расстояние 300 км при квадратурной модуляции со сдвигом по фазе и мультиплексировании с разделением каналов по поляризации (PDM-QPSK). Передача происходит без ошибок, если использовать алгоритмы прямого исправления ошибок с избыточностью 7%. Другой эксперимент по передаче данных с терабитной скоростью, где использовалась гребенка, генерируемая в резонаторе из SiN, осуществлен в [17]. Скорость 19.7 Тбит/с достигалась путем передачи потоков данных со скоростью 224 Гбит/с по 94 линиям гребенки в спектральных диапазонах C и L при формате модуляции PDM-16-QAM. Все каналы, кроме двух, имели частоту появления ошибочных битов (BER) ниже 4.5×10^{-3} , что представляет собой предел для FEC с избыточностью 7%. В одном из последних экспериментов по передаче данных с WDM [18] использовалась ОЧГ, генерируемая в микрорезонаторе из Si₃N₄. Скорость около 30 Тбит/с достигалась в формате 16-QAM на 94 линиях гребенки, отстоящих друг от друга примерно на 100 ГГц.

4. Генерация ОЧГ на основе мод шепчущей галереи в микросферических резонаторах

Проведенные эксперименты, результаты и методы генерации частотных гребенок, описанные в этом разделе, перспективны для телекоммуникационных приложений, например, в плане создания многоволновых источников света для оптических систем передачи. Ниже обсуждаются два метода генерации частотных гребенок на основе мод шепчущей галереи (WCOMB). Первый метод основан на использовании микросферического WGMR из SiO₂ и конического волокна, а второй – на использовании установки, состоящей из линз, призм и микросферического WGMR в свободном пространстве. Критическим элементом для обоих подходов является высокочастотный микросферический WGMR. Такие WGMR имеют добротность по крайней мере 2×10^7 , что определяется их гладкой поверхностью, а также низкими внутренними и внешними потерями [27, 53]. В ходе исследований нами уста-

новлено, что оптимальный для WGMR диаметр микросферы составляет 270 мкм.

4.1. Экспериментальные установки для генерации WCOMB

Для установки, генерирующей WCOMB по первому сценарию (рис.2), мы изготовили микросферы из SiO₂ и коническое волокно. Согласно предыдущим исследованиям [54], для получения микросферического WGMR конец оптического кварцевого волокна (Light Guide Optics, Латвия) с сердцевинной в несколько раз толще, чем у стандартного одномодового волокна, оплаивался пламенем водородной горелки. Для изготовления конического волокна использовался отрезок стандартного одномодового световода SMF28 с удаленным двухслойным покрытием, что можно сделать как механическим, так и химическим способом. В данном случае применялся механический метод, т.к. было не вполне ясно, какие материалы и смеси использовались в указанных покрытиях. Итак, волокно раз-

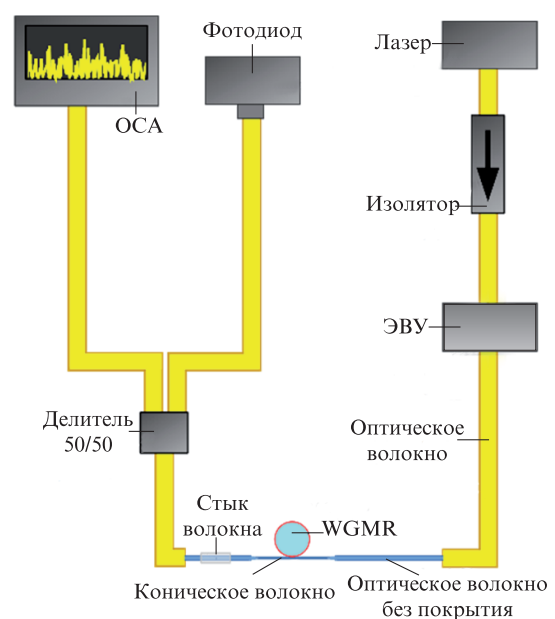


Рис.2. Установка для генерации WCOMB на основе микросферического WGMR из SiO₂ и конического волокна.

резается пополам, защитные слои удаляются и очищенные концы волокна состыковываются с помощью сварки. Для сварки мы использовали аппарат Sumitomo Fusion Splicer - T 71C с автопараметрами, установленными для волокна ITU-T G.652. Место сварки затем защищалось предохранительным рукавом.

После состыковки волокна осуществлялось его вытягивание в пламени водородной горелки для получения конусности. Волокно SMF28 вытягивалось с постоянной скоростью 80 мкм/с, длина суженного участка тейпера составляла 21–23 мм. Изменение пропускания волокна, непрерывно измеряемое в процессе вытяжки, показано на рис.3. Виден момент, когда оболочка и сердцевина волокна начинают плавиться, и одномодовое волокно становится многомодовым. При дальнейшем растяжении (примерно через 280–285 с) волокно снова становится одномодовым. Продолжительность всего процесса составляет 290 с. До начала сужения волокна амплитуда сигнала пропускания равна 3.92 В, а после окончания вытяжки – 3.75 В; таким образом, результирующее пропускание составило ~96% от начального.

В передающей части установки для генерации оптического сигнала использовался одномодовый лазер (Thorlabs SFL1550S) с центральной длиной волны 1550 нм и мощностью 40 мВт в сканирующем режиме. При мощности лазера накачки, достаточной для генерации гребенки, микросфера нагревается, в результате чего ее резонансная частота сдвигается относительно линии возбуждения. Для генерации частотной гребенки необходимо, чтобы лазерная частота входила в резонанс с линией WGM быстрее, чем резонатор успевает нагреться [39]. Эффект Керра, отвечающий за генерацию ОЧГ, является мгновенным, поэтому при генерации керровской гребенки мы изменяли ток инжекции лазера пилообразно с частотой повторения около 1 кГц и уходом частоты 2 ГГц.

На выходе лазера установлен оптический изолятор, защищающий лазер от отраженных сигналов. Выход изолятора соединен с ЭВУ, выходная мощность которого фиксирована на уровне 20 дБм, а выход усилителя – с таким же одномодовым волокном SMF28 (с покрытием 900 мкм), какое использовалось при изготовлении тейпера.

В приемной части установки для обеспечения параллельного мониторинга применялся оптический делитель мощности 50/50. Один из портов делителя соединен с ОСА высокого разрешения (0.01 нм), а второй порт – с фотодетектором на InGaAs, работающим в полосе длин волн 800–1800 нм и соединенным с осциллографом, отображающим форму сигнала. Для генерации WCOMB важен контроль расстояния между коническим волокном и микросферическим WGMR (см. разд.4.2). Воздушные потоки, распространяющиеся вокруг тонкого конического волокна и микросферы, смещают оба этих элемента. Рас-

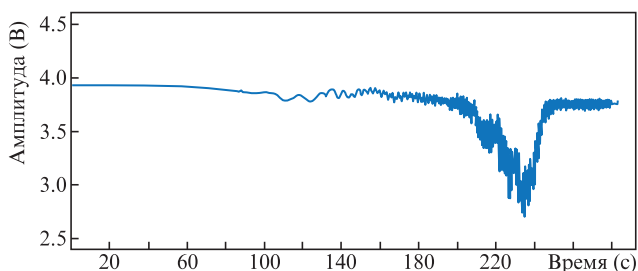


Рис.3. Изменение пропускания волокна в процессе его вытяжки.

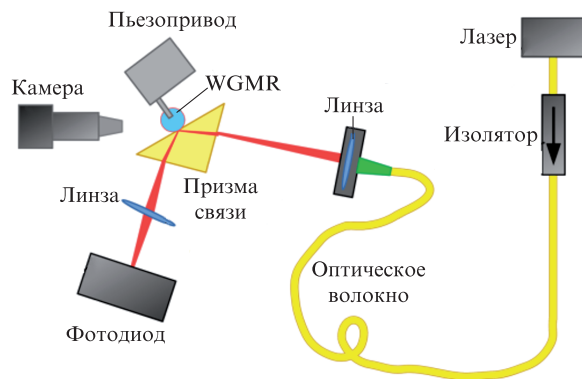


Рис.4. Установка для генерации WCOMB, состоящая из расположенных в свободном пространстве линз, призмы и микросферического WGMR.

стояние между ними меняется, что, в свою очередь, изменяет передаваемую мощность накачки, вызывая флуктуации спектра частотной гребенки. Поэтому коническое оптическое волокно должно быть натянуто и заключено в защитный корпус, который также помогает защитить оба элемента от пыли, меняющей добротность микросферы из-за потерь на загрязненной пылинками поверхности.

Установка для реализации второго сценария генерации WCOMB (рис.4) основана на использовании расположенных в свободном пространстве линз, призмы связи и WGMR. Вся установка легко собирается и заключается в корпус. В передающей части установки применяется такой же одномодовый лазерный диод мощностью 40 мВт, как и в первом сценарии. Лазер с фиксированной длиной волны 1550 нм используется в сканирующем режиме. Одним из основных компонентов установки является призма оптической связи. Оптическая линза служит для фокусировки пучка на поверхность призмы, где происходит полное внутреннее отражение. Для ввода оптического сигнала в микросферический WGMR используется столик трехмерного поступательного перемещения, поскольку микросферический резонатор должно быть сфокусировано с точкой полного внутреннего отражения призмы. Смещение столика по трем координатам для достижения критической связи осуществляется пьезоэлектрическим двигателем. В приемной части установки мониторинг сигнального резонанса проводится при помощи фотоприемника из InGaAs (полоса длин волн 800–1800 нм).

4.2. Полученные результаты и их обсуждение

Поставленные цели были достигнуты, и первая оптическая частотная гребенка была успешно сгенерирована на нашей установке с тейпером и микросферическим WGMR из SiO₂ (рис.5). Как видно из спектра гребенки, расстояние между ее линиями составляет 2 нм (257 ГГц), что сравнимо с расстояниями для гребенок из работ [11, 14, 18, 22, 24]. В представленном здесь эксперименте спектр ОЧГ записывался в результате свипирования частоты лазера. В будущем для получения стационарного спектра гребенки мы планируем использовать привязку частоты лазера и резонанса WGM с помощью контура обратной связи [39]. Из рис.5 видно, что в спектре гребенки некоторые линии отсутствуют. Это можно объяснить как особенностями развертки частоты лазера, так и эффектами пересечения мод, поскольку микросферический резонатор имеет богатый модовый спектр. Когда две простран-

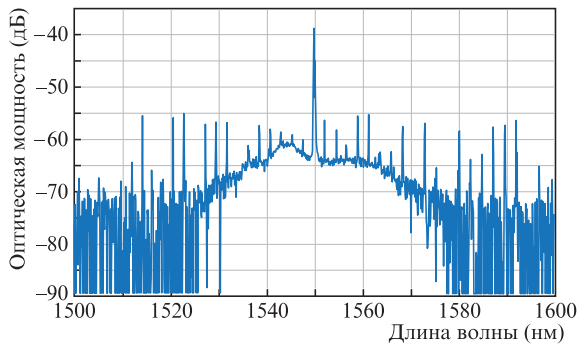


Рис.5. Оптический спектр первой ОЧГ, полученной на установке, показанной на рис.2.

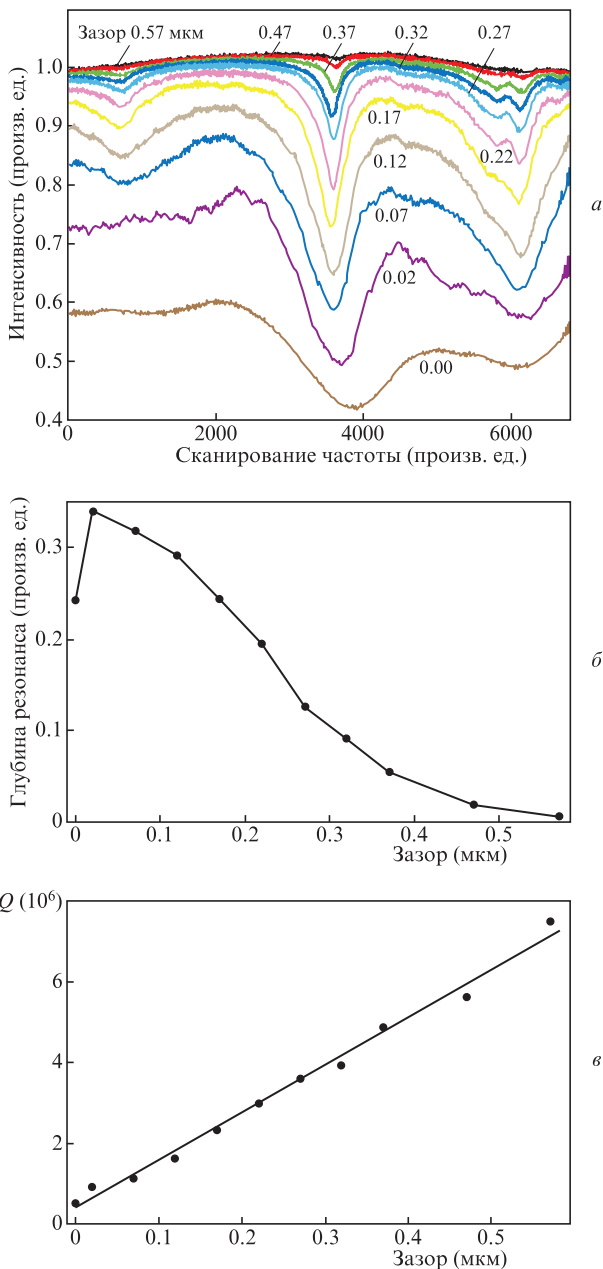


Рис.6. Зависимость условий связи от расстояния между призмой и микросферическим резонатором (второй сценарий) при постепенном уменьшении зазора: изменение спектров пропускания для резонансов WGM (а), глубины резонансного провала (б) и добротности (в). Цветной вариант рис.6,а помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

ственные моды входят в резонанс на одной длине волны, интенсивность линии гребенки падает из-за передачи мощности другому семейству мод [55, 56].

Как уже отмечалось выше, при изменении условий связи меняется добротность резонатора. Изменение связи в нашем случае означает изменение расстояния между микросферой и призмой и, следовательно, изменение нагрузки резонатора. Величина добротности показывает, как долго мощность накачки остается локализованной в резонаторе, и, уменьшив потери связи (увеличив расстояние), можно увеличить добротность [2]. Из уравнения (2) следует, что чем уже резонанс, тем выше добротность. Поэтому, увеличивая расстояние между призмой и микросферой, мы уменьшаем ширину резонанса (рис.6,а). Увеличение добротности с увеличением зазора показано на рис.6,в. Метод оценки добротности заключался в следующем. Сначала шкала частот пересчитывалась из произвольных единиц в мегагерцы при помощи сигнала электрооптического модулятора. При частоте модуляции 100 МГц с обеих сторон резонанса появлялись боковые частоты. Для вычисления ширины резонанса форма резонансного пика WGM подгонялась под функцию Лоренца. Добротность рассчитывалась по формуле $Q = f/\Delta f$, где f – частота света, а Δf – полная ширина резонанса на уровне половины максимума.

Рассмотрим нагрузку резонатора для трех уровней связи: недостаточном, избыточном и критическом [57]. При недостаточном уровне связи призма находится далеко (на расстоянии 0.57 мкм) от микросферы. Потери связи низкие, но передаваемая мощность накачки слишком мала для преодоления внутренних потерь, обусловленных поглощением, что видно по интенсивности резонанса (см. рис.6,а). Когда зазор равен 0.47 мкм, глубина резонансного провала составляет (в произв. ед.) ~ 0.025 (рис.6,б), а добротность – порядка 6×10^6 (рис.6,в). В избыточном режиме связи мощность излучения внутри резонатора велика, но велики и потери связи, поэтому добротность низкая. Так, при нулевом зазоре добротность составляет всего $\sim 5 \times 10^5$, хотя глубина резонансного провала – порядка 0.25. Отсюда следует, что предпочтительным является режим критической связи, обеспечивающий баланс между передачей мощности накачки и увеличением потерь связи. Учитывая это, приходим к выводу, что оптимальное расстояние между призмой и микросферой должно быть от 0.12 до 0.17 мкм.

5. Заключение

Дан обзор проведенных ранее экспериментов по генерации частотных гребенок и их применению в телекоммуникациях. Построена обобщенная модель генератора частотной гребенки на основе используемых генераторов на микрорезонаторах различных типов. Основные параметры и характеристики генераторов частотных гребенок обсуждены и собраны в табл.1 и 2. Исследована генерация частотной гребенки в установке на основе конического волокна (тейпера), полученного из одномодового световода SMF28, и микросферического резонатора с модой шепчущей галереи. Расстояние между линиями частотной гребенки составило 2 нм (257 ГГц). Для изготовления тейпера сконструирована установка для вытяжки волокна, обеспечивающая результирующее пропускание $\sim 96\%$. Для контроля процесса вытяжки проведен мониторинг сигнала пропускания. Микросферический WGM, имеющий до-

бротность не ниже 2×10^7 и оптимальный диаметр 270 мкм, изготавливался из производимого в Латвии оптического волокна с сердцевиной толще, чем у стандартных одномодовых волокон. Для будущих экспериментов создан генератор частотной гребенки на основе оптических элементов в свободном пространстве и показана важность величины зазора между призмой и микросферой. Установлено, что предпочтительная величина зазора лежит в интервале 0.12–0.17 мкм. Работа по улучшению качества микрорезонаторов будет продолжена.

Работа поддержана Европейским фондом регионального развития по теме «Разработка генератора оптических гребенок на основе микрорезонатора с модой шепчущей галереи и его применение в телекоммуникациях» (проект № 1.1.1.1/18/A/155).

- Savchenkov A.A., Matsko A.B., Ilchenko V.S., Solomatine I., Seidel D., Maleki L. *Phys. Rev. Lett.*, **101**, 093902 (2008).
- Savchenkov A.A., Matsko A.B., Maleki L. *Nanophotonics*, **5**, 363 (2016).
- Lin G., Diallo S., Chembo Y.K. *Proc. 17th Intern. Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON) 2015* (Budapest, 2015, p. 1).
- Del'Haye P., Schliesser A., Arcizet O., Wilken T., Holzwarth R., Kippenberg T.J. *Nature*, **450**, 1214 (2007).
- Liapis O., Merrer P.H., Bouchier A., Saleh K., Cibiel G. *Proc. SPIE*, **7579**, 75791B (2010).
- Pasquazi A., Peccianti M., Razzari L., Moss D.J., Coen S., Erkintalo M., Chembo Y.K., Hansson T., Wabnitz S., Del'Haye P., Xue X., Weiner A.M., Morandotti R. *Phys. Rep.*, **729**, 1 (2018).
- Liang W., Savchenkov A.A., Matsko A.B., Ilchenko V.S., Seidel D., Maleki L. *Opt. Lett.*, **36**, 2290 (2011).
- Liang W., Matsko A.B., Savchenkov A.A., Ilchenko V.S., Seidel D., Maleki L. DOI: 10.1109/ics.2011.5977756.
- Pfeifle J. *Karlsruhe Series in Photonics & Communication*, **20** (2017).
- Levy J.S., Gondarenko A., Foster M.A., Turner-Foster A.C., Gaeta A.L., Lipson M. *Nature Photon.*, **4**, 37 (2010).
- Foster M.A., Levy J.S., Kuzucu O., Saha K., Lipson M., Gaeta A.L. *Opt. Express*, **19**, 14233 (2011).
- Jazayerifar M., Jamshidi K. *Proc. 2016 IEEE Photonics Soc. Summer Topical Meeting Series (SUM)* (Newport Beach, 2016, p. 84).
- Kurbatska I., Bobrov V., Alsevska A., Lyashuk I., Gegere L. *Progress in Electromagnetics Research Symposium* (St. Petersburg, 2017, pp 1771–1777). DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262037.
- Pfeifle J., Weimann C., Bach F., Riemensberger J., Hartinger K., Hillerkuss D., Jordan M., Holtzwarth R., Kippenberg T.J., Leuthold J., Freude W., Koos C. *Proc. 2012 Optical Fiber Communication Conf.* (Los Angeles, 2012, p. 3).
- Pfeifle J., Laueremann M., Wegner D., Brasch V., Herr T., Hartinger K., Li J., Hillerkuss D., Schmogrow R., Holtzwarth R., Freude W., Leuthold J., Kippenberg T.J., Koos C. *Nature Photon.*, **8**, 375 (2014).
- Pfeifle J., Kordts A., Marin P., Karpov M., Pfeiffer M.H., Brasch V., Rosenberger R., Kemal J., Wolf S., Freude W., Kippenberg T.J., Koos C. *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2015* (San Jose, 2015, p. 2).
- Marin-Palomo P., Kemal J.N., Karpov M., Kordts A., Pfeifle J., Pfeiffer M.H., Trocha P., Wolf S., Brasch V., Anderson M.H., Rosenberger R., Vijayan K., Freude W., Kippenberg T.J., Koos C. *Nature*, **546**, 274 (2017).
- Pfeifle J., Coillet A., Henriot R., Saleh K., Schindler P., Weimann C., Freude W., Balakireva I.V., Larger L., Koos C., Chembo Y.K. *Phys. Rev. Lett.*, **114**, 093902 (2015).
- Avino S., Giorgini A., Malara P., Gagliardi G., Natale P.D. *Opt. Express*, **21**, 13785 (2013).
- Анашкина Е.А., Сорокин А.А., Марисова М.П., Андрианов А.В. *Квантовая электроника*, **49**, 371 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 371 (2019)].
- Sorokin A.A., Marisova M.P., Andrianov A.V., Anashkina E.A. *Proc. Intern. Conf. on Information Science and Communications Technologies (ICISCT)* (Tashkent, Uzbekistan, 2019).
- Song Z., Lei S., Linhao R., Yanjing Z., Bo J., Bowen X., Xinliang Z. *Nanophotonics*, **8**, 2321 (2019).
- Coillet A., Balakireva I., Henriot R., Saleh K., Larger L., Dudley J.M., Menyuk C.R., Chembo Y.K. *IEEE Photon. J.*, **5**, 6100409 (2013).
- Grudin I.S., Yu N., Maleki L. *Opt. Lett.*, **34**, 878 (2009).
- Kippenber T.J., Gaeta A.L., Lipson M., Gorodetsky M.L. *Science*, **361**, 6402 (2018).
- Herr T., Hartinger K., Riemensberger J., Wang C.Y., Gavartin E., Holzwarth R., Gorodetsky M.L., Kippenberg T.J. *Nature Photon.*, **6**, 480 (2012).
- Bogaerts W., De Heyn P., Vaerenbergh T.V., De Vos K., Selvaraja S.K., Claes T., Dumon P., Bienstman P., Van Thorhout D., Baets R. *Laser Photon. Rev.*, **6**, 47 (2012).
- Loh W., Yegnanarayanan S., O'Donnell F., Juodawlkis P.W. *Optica*, **6**, 152 (2019).
- Liang W., Savchenkov A.A., Ilchenko V.S., Eliyahu D., Matsko A.B., Maleki L. *IEEE Photon. J.*, **9**, 5502411 (2017).
- Zhang J., Li F., Li J., Li Z. *Proc. 16th Intern. Conf. on Optical Communications and Networks (ICOON) 2017* (Wuzhen, 2017, p. 3).
- Lucas E., Jost J.D., Kippenberg T.J., Beha K., Lezius M., Holzwarth R. *Proc. Joint Conf. EFTF/IFCS* (Besancon, 2017, pp 530–533).
- Marin P., Pfeifle J., Karpov M., Trocha P., Rosenberger R., Vijayan K., Wolf S., Kemal J., Kordts A., Pfeiffer M., Brasch V., Freude W., Kippenberg T.J., Koos C. *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2016* (San Jose, USA, 2016, p. 2).
- Liao P., Bao C., Almain A., Kordts A., Karpov M., Pfeiffer M.H.P., Zhang L., Alishahi F., Cao Y., Zou K., Fallahpour A., Willner A.N., Tur M., Kippenberg T.J., Willner A.E. *J. Light. Wave Technol.*, **37**, 579 (2019).
- Pfeifle J., Yu Y., Schindler P.C., Brasch V., Herr T., Weimann C., Hartinger K., Holzwarth R., Freude W., Kippenberg T.J., Koos C. *Proc. 2014 Optical Fiber Communication Conf.* (San Francisco, 2014, p. 3).
- Herr T., Wang C.Y., Del'Haye P., Schliesser A., Hartinger K.K., Holtzwarth R., Kippenberg T.J. *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2011* (Baltimore, 2011, paper QTuF1).
- Herr T., Hartinger K., Riemensberger J., Wang C.Y., Gavartin E., Holzwarth R., Gorodetsky M.L., Kippenberg T.J. *Nature Photon.*, **6**, 480 (2012).
- Liang W., Eliyahu D., Ilchenko V.S., Savchenkov A.A., Matsko A.B., Seidel D., Maleki L. *Nat. Commun.*, **6**, 7975 (2015).
- Pavlov N.G., Lihachev G., Koptyaev S., Voloshin A.S., Ostapchenko A.D., Gorodnitskiy A.S., Gorodetsky M.L. *Proc. 19th Intern. Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON) 2017* (Girona, Spain, 2017, p. 3).
- Agha I.H., Okawachi Y., Gaeta A.L. *Opt. Express*, **17**, 16209 (2009).
- Ming L., Xiang W., Liying L., Lei X. *Opt. Express*, **21**, 16908 (2013).
- Papp S.B., Del'Haye P., Diddams S.A. *Phys. Rev. X*, **3**, 31003 (2013).
- Webb K.E., Jang J.K., Anthony J., Coen S., Erkintalo M., Murdoch S.G. *Opt. Lett.*, **41**, 277 (2016).
- Webb K.E., Erkintalo M., Coen S., Murdoch S.G. *Opt. Lett.*, **41**, 4613 (2016).
- Kubota A., Suzuki R., Fujii S., Tanabe T. *Proc. CLEO/Europe-EQEC* (Munich, 2017). DOI 10.1109/CLEOE-EQEC.2017.8087288.
- Grudin I.S., Huet V., Yu N., Matsko A.B., Gorodetsky M.L., Maleki L. *Optica*, **4**, 434 (2017).
- Razzari L., Duchesne D., Ferreram M., Morandotti R., Chum S., Little B.E., Moss D.J. *Nature Photon.*, **4**, 41 (2010).
- Jung H., Xiong C., Fong K.Y., Zhang X., Tang H.X. *Opt. Lett.*, **38**, 2810 (2013).
- Hojoong J., King F.Y., Chi X., Hong T.X. *Opt. Lett.*, **39**, 84 (2014).
- Levy S., Saha K., Okawachi Y., Foster M.A., Gaeta A.L., Lipson M. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **24**, 1375 (2012).
- Del'Haye P., Schliesser A., Arcizet O., Wilken T., Holzwarth R., Kippenberg T.J. *Nature*, **450**, 1214 (2007).
- Del'Haye P., Herr T., Gavartin E., Holzwarth R., Kippenberg T.J. *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 063901 (2009).
- Li J., Lee H., Chen T., Vahala K.J. *Phys. Rev. Lett.*, **109**, 233901 (2012).
- Fulop A. *Fiber-Optic Communications with Microresonator Frequency Combs* (Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2018).
- Brice I., Grundsteins K., Atvars A., Alnis J., Viter R., Ramanavicius A. *Sensors and Actuators B: Chem.*, **318**, 128004 (2020).
- Fujii S., Tanabe T. *Nanophotonics*, **9** (5), 2019 (2020).
- Savchenkov A.A., Matsko A.B., Liang W., Ilchenko V.S., Seidel D., Maleki L. *Opt. Express*, **20**, 27290 (2012).
- Demirtzioglou I., Lacava C., Bottrill K.R.H., Thomson D.J., Reed G.T., Richardson D.J., Petropoulos P. *Opt. Express*, **26**, 790 (2018).