

**ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ
И НЕЛИНЕЙНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ**

УДК 535.530.182

**ВОЛОКОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ СУПЕРКОНТИНУУМА
С РАСШИРЕННЫМ НАБОРОМ УПРАВЛЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ
В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ**

© 2009 г. С. М. Кобцев, С. В. Смирнов

Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

E-mail: kobtsev@lab.nsu.ru

Поступила в редакцию 22.01.2009 г.

Проанализированы различные методы управления параметрами излучения суперконтинуума (СК). В частности, рассмотрены возможность изменения спектральной плотности мощности СК за счет изменения частоты следования импульсов и длины волны излучения лазера накачки, повышение степени когерентности СК за счет выбора оптимальной фазовой модуляции импульсов накачки, изменение частоты следования импульсов СК, генерируемых в схеме с двухволновой накачкой, за счет изменения разности частот. Предложен новый способ управления шириной спектра и уровнем спектральной плотности мощности суперконтинуума, генерируемого при непрерывном возбуждении, с использованием дополнительной шумовой компоненты накачки.

PACS: 42.65.-k, 42.65.Wi, 42.72.-g

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость в широкополосном когерентном излучении – суперконтинууме (СК) – возникает при решении самых различных задач нанотехнологий, оптических коммуникаций, метрологии, биомедицины, спектроскопии и других приложений. Однако разные приложения предъявляют разные, порой несовместимые друг с другом требования к свойствам СК. Так, например, для метрологии оптических частот необходим СК с шириной спектра не менее одной октавы, обладающий высокой стабильностью амплитуды и фазы, тогда как для моговолновых источников в технологии WDM оказывается достаточным относительно небольшой ширины спектра СК, при этом на первый план выходят требования к однородности спектральной плотности мощности и к регулярности временной структуры излучения, которая должна иметь вид периодической последовательности одиночных импульсов. Для целей оптической когерентной томографии необходим широкополосный СК с низким уровнем шумов и достаточно произвольным профилем спектральной плотности мощности, тогда как в схемах генерации ультракоротких импульсов используется СК с временным распределением интенсивности в виде последовательности одиночных импульсов с квадратичной и кубической фазовой модуляцией [1]. В схемах встречной накачки волоконных рамановских усилителей [2] востребован СК со специальным профилем спектральной плотности мощности, обеспечивающим однородный по спектру коэффициент усиления.

Одним из подходов к созданию универсально-генератора СК, который может быть использован при решении широкого круга задач разных приложений, является разработка методов динамического изменения параметров СК с тем, чтобы излучение такого универсального СК удовлетворяло требованиям если не всех задач, то, по крайней мере, значительного их числа. Кроме того, необходимость динамического изменения параметров генерации СК непосредственно возникает в спектроскопии, цитометрии, в биомедицинских и других приложениях. Заметим, что существующие на сегодняшний день генераторы СК имеют, как правило, лишь регулировку общей мощности излучения и плавную перестройку одной или нескольких длин волн, выделяемых внешним управляемым спектральным фильтром в ограниченной области из широкого спектра СК. При этом регулировка общей мощности обычно основана на изменении мощности излучения накачки; поскольку последняя определяет также и ширину спектра СК, данный подход неэффективен с точки зрения регулировки спектральной плотности мощности СК.

В данной работе анализируются различные методы, которыми можно реализовать изменение параметров широкополосного излучения, получаемого с использованием наиболее широко распространенной схемы генератора СК. Эта схема состоит из источника накачки (который может включать задающий генератор и усилитель), нелинейного оптического волокна, в котором происходит спектральное уширение накачки, а также фильтра/преобразователя. Последний может осу-

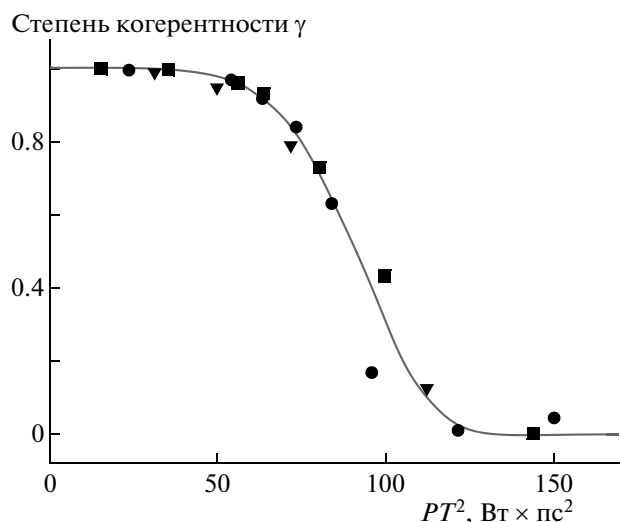


Рис. 1. Зависимость степени межимпульсной когерентности СК от произведения пиковой мощности P и квадрата длительности T импульсов накачки при мощности 10 (квадраты), 15 (круги), 20 кВт (треугольники).

шествлять, например, выделение одной или нескольких спектральных компонент из широкого спектра СК, компенсацию частотной модуляции селективируемых импульсов и т.д. К числу динамически варьируемых параметров источника накачки относятся мощность и длина волны излучения; длительность, фазовая модуляция, частота следования и форма импульсов (для импульсной накачки); спектральный состав (ширина линий и мощность различных спектральных компонент) для непрерывной накачки. Нелинейное оптическое волокно, используемое для спектрального уширения накачки, предоставляет значительно меньшие возможности для регулировки, к числу которых относятся возможность перестройки записанных в волокнах брэгговских решеток показателя преломления, термоэффекты и создание наведенной анизотропии и др. С помощью конечного преобразователя излучения можно управлять, например, шириной и положением селективируемых спектральных линий, длительностью и фазовой модуляцией импульсов, а также частотой их повторения (при использовании мультиплексоров). Варьируя перечисленные выше параметры схемы генератора, можно добиться изменения одного или нескольких параметров выходного излучения: ширины и формы спектра СК, общей мощности и спектральной плотности мощности, когерентности и параметров временного распределения. Ниже мы проанализируем влияние динамически изменяемых параметров накачки на характеристики генерируемого СК. Проведенный анализ основывается как на результатах наших собственных эксперименталь-

ных исследований и компьютерного моделирования (численном решении обобщенного нелинейного уравнения Шредингера), так и результатах работ других авторов.

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ СУПЕРКОНТИНУУМА

Результаты наших предыдущих исследований показывают, что увеличение мощности накачки приводит, как правило, к росту мощности генерируемого СК и увеличению ширины его спектра как при импульсном [3], так и при непрерывном [4] возбуждении. При импульсной накачке увеличение мощности сопровождается, кроме того, ростом числа пиков в спектрах и во временной структуре излучения СК, а также снижением степени межимпульсной когерентности. На рис. 1 представлена полученная в численном моделировании [5] зависимость степени межимпульсной когерентности СК от произведения квадрата длительности T на мощность P импульсов накачки. Заметим, что при достаточно высоких уровнях мощности накачки наблюдается насыщение мощности генерируемого СК [6], что связано с ростом потерь энергии на вынужденное комбинационное рассеяние и поглощением в кварцевых волокнах в УФ и ИК областях. Указанный эффект может ограничить применимость метода регулировки параметров СК, основанного на изменении мощности накачки, что стимулирует поиск альтернативных решений.

Один из альтернативных способов регулировки ширины спектра СК и соответственно уровня его спектральной плотности мощности основан на изменении длины волны импульсов накачки в окрестности длины волны нулевой дисперсии волокна. Ранее нами уже была продемонстрирована принципиальная возможность такой регулировки с использованием импульсов накачки титансапфирового лазера длительностью 80 фс, пере-страиваемых по длине волны от 789 до 847 нм [7]. Результаты наших последних исследований [8] свидетельствуют о еще более сильной зависимости эффективности генерации СК от длины волны накачки при использовании пикосекундных импульсов возбуждения. Так, изменение длины волны импульсов накачки длительностью 1 пс всего на 9 нм приводит к изменению ширины спектра генерируемого СК более чем в 3 раза по уровню -15 дБ и более чем в 5 раз по уровню -10 дБ (рис. 2). Данная зависимость качественно воспроизводится и в численном моделировании. При этом некоторые отличия в наклоне и абсолютных значениях ширины спектра на экспериментальных и расчетных графиках на рис. 2 могут быть обусловлены погрешностями определения входных параметров моделирования — энергии и

длительности импульсов накачки, длины волны нулевой дисперсии волокна.

За счет уменьшения длительности спектрально-ограниченных импульсов накачки можно достичь повышения степени межимпульсной когерентности СК (рис. 1) и увеличения ширины его спектра. Эти выводы подтверждаются как результатами наших предыдущих исследований [5], так и работами других авторов [9, 10].

Фазовая модуляция (чирп) импульсов накачки оказывает влияние как на ширину спектра СК, так и на его когерентность. Результаты наших экспериментальных [11] исследований и численного моделирования [5] свидетельствуют о том, что наибольшее спектральное уширение и максимальная степень когерентности достигаются при близких к нулю значениях фазовой модуляции импульсов накачки.

Варьируя частоту следования импульсов накачки при фиксированной энергии импульсов, можно достичь, очевидно, изменения средней мощности излучения СК и уровня его спектральной плотности мощности при неизменной ширине спектра генерации.

Один из возможных способов управления СК, генерируемого при непрерывной накачке, основан на изменении ширины спектра возбуждения. Так, ранее в экспериментах [6] было показано, что увеличение ширины линии накачки приводит к повышению эффективности генерации и сглаживанию спектров СК. На важную роль конечности временной когерентности накачки для генерации СК указывалось также и в работах [4, 12], где генерация СК при непрерывном возбуждении исследовалась с помощью численного моделирования. Заметим, однако, что типичная экспериментальная реализация [6] основана на использовании различных источников накачки и спектральных фильтров с различной шириной полосы пропускания, что означает внесение изменений в схему генератора и делает данный метод непригодным для управления параметрами СК в реальном режиме времени. Альтернативный метод, позволяющий осуществлять плавную перестройку ширины спектра и уровня спектральной плотности мощности суперконтинуума при непрерывном возбуждении в реальном масштабе времени, может быть основан на введении в накачку дополнительной (шумовой) спектральной компоненты и плавном изменении ее мощности. Действительно, как было показано нами ранее [4], генерация СК при непрерывной накачке инициируется развитием модуляционной неустойчивости (МН), приводящей к распаду непрерывной накачки на стохастическую последовательность импульсов. Как показывает численное моделирование [4], при типичных экспериментальных параметрах [13] для развития МН необходим начальный участок волокна длиной до нескольких

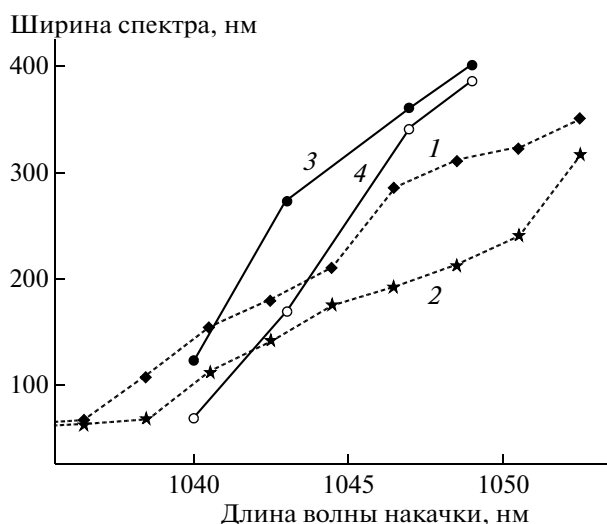


Рис. 2. Зависимость ширины спектра СК, генерируемого в трехметровом отрезке волокна SC-5.0-1040, от длины волны импульсов накачки (1 пс, 1 нДж), по уровню -20 (1), -15 (2, 3), -10 дБ (4); модель (1, 2) и эксперимент (3, 4).

сотен метров, тогда как основное спектральное уширение происходит на оставшейся длине волокна и связано с формированием самосдвинутых по частоте солитонов (эффект вынужденного комбинационного саморассеяния). В основе предлагаемого нами нового метода управления шириной спектра СК лежит введение в волокно помимо непрерывной накачки слабого шумоподобного сигнала, лежащего в спектральной области усиления МН. Введение затравочного шума приведет к уменьшению длины волокна, необходимой для развития МН и формированию солитонов и, как следствие, к увеличению длины волокна, на которой происходит самосдвиг частоты солитонов и рост ширины спектра СК. Таким образом, увеличением мощности дополнительной шумовой компоненты накачки можно добиться роста ширины спектра СК. Работоспособность данного механизма подтверждается проведенным нами численным моделированием (рис. 3). Расчеты проведены с использованием параметров высоконелинейного волокна длиной 200 м, взятых из эксперимента [13], и мощности непрерывной накачки $P = 4$ Вт. Превышение мощности затравочного шума над уровнем квантовых шумов приведено на рис. 3, при этом отношение мощности шумовой компоненты к мощности накачки не превышает 0.5%.

Особенностью режима генерации СК при непрерывной накачке является нерегулярная временная структура его излучения, что может существенно ограничить область применимости широкополосного излучения. Для регуляризации временного распределения интенсивности спек-

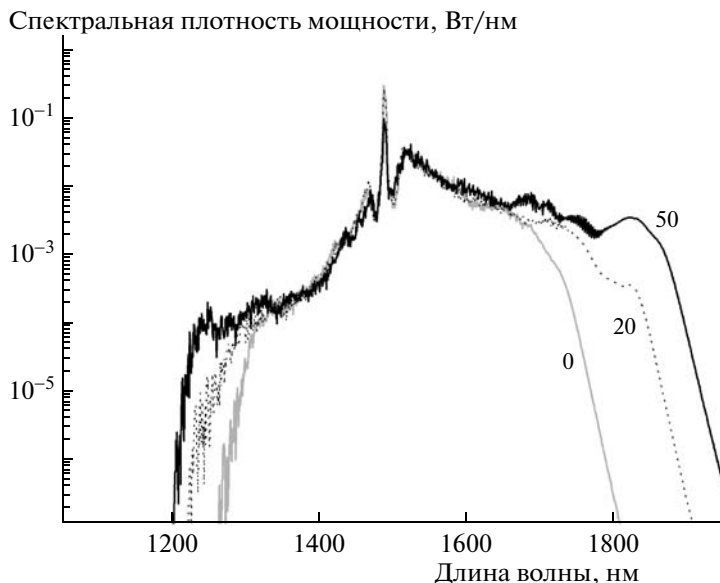


Рис. 3. Спектры СК, генерируемые в высоконелинейном волокне [13] при мощности затравочного шума в накачке 0, 20, 50 дБ.

трально уширенного излучения можно использовать амплитудную модуляцию излучения на входе в волокно [14, 15]. В процессе распространения излучения накачки по волокну глубина модуляции будет увеличиваться за счет эффекта индуцированной модуляционной неустойчивости, что приведет к распаду непрерывной волны на последовательность импульсов. Частота повторения генерируемых импульсов определяется частотой амплитудной модуляции волны накачки и допускает перестройку в пределах от нескольких десятков гигагерц до 1 ТГц [16]. Для перестройки частоты импульсов в режиме реального времени необходимо учитывать зависимость длины волокна,

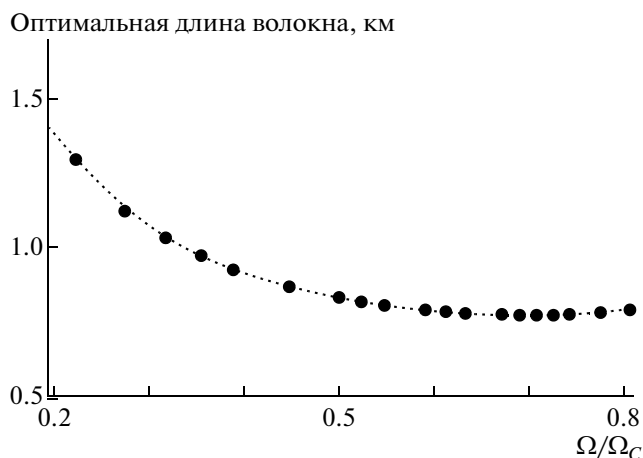


Рис. 4. Зависимость оптимальной длины волокна от частоты начальной модуляции Ω (Ω_C – характеристическая частота модуляционной неустойчивости [19]).

на которой происходит формирование импульсов, от частоты начальной модуляции (рис. 4). Поскольку реальная длина волокна генератора СК остается неизменной, перестройку частоты начальной модуляции необходимо сопровождать также изменением глубины модуляции, компенсируя тем самым приведенную на рис. 4 зависимость. Изменение длины эффективного форми-

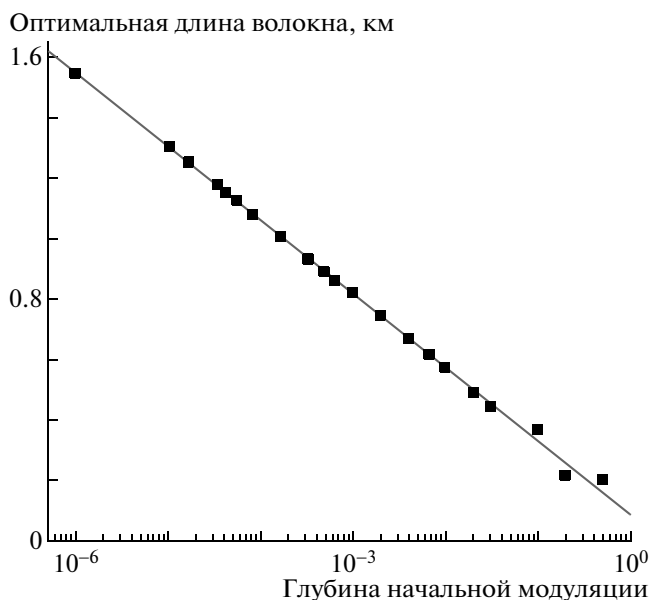


Рис. 5. Зависимость оптимальной длины волокна от глубины начальной модуляции интенсивности накачки. Точки – результат моделирования, прямая – линейная аппроксимация.

рования импульсов как функция начальной глубины модуляции интенсивности излучения накачки, полученная в результате численного моделирования, показано на рис. 5. Помимо частоты следования импульсов, изменение частоты начальной амплитудной модуляции в данной схеме позволяет варьировать длительность импульсов на выходе из волокна. Проведенное нами численное моделирование [17] показывает, что зависимость длительности импульсов на выходе из волокна от частоты Ω начальной амплитудной модуляции близка к квадратичной. Кроме того, частотой и глубиной начальной модуляции определяется и соотношение шум/сигнал на выходе из волокна [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализирован ряд методов динамического управления параметрами волоконных генераторов суперконтинуума и, в частности, рассмотрен новый метод управления шириной спектра СК, основанный на изменении мощности затравочного шума в непрерывной накачке. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что в существующих на сегодняшний день генераторах реализована лишь малая часть возможностей управления параметрами СК. Усовершенствование генераторов СК в данном направлении позволит создать универсальные источники широкополосного когерентного оптического излучения, востребованные при решении широкого круга задач в физике, биологии, химии, медицине и в других областях.

Данная работа проведена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (госконтракт № 02.513.11.3360), а также ведущей научной школы РФ чл.-корр. РАН А.М. Шалагина и чл.-корр. РАН С.Г. Раутиана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fork R.L., Brito Cruz C.H., Becker P.C., Shank C.V.* // Opt. Lett. 1987. V. 12. P. 483.
2. *Smirnov S.V., Ania-Castanon J.D., Ellingham T.J., Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Turitsyn S.K.* // Optical Fiber Technology. 2006. V. 12. № 2. P. 122.
3. *Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fateev N.V., Smirnov S.V.* // Laser Phys. 2004. V. 14. P. 748.
4. *Kobtsev S.M., Smirnov S.V.* // Opt. Express. 2005. V. 13. P. 6912.
5. *Kobtsev S.M., Smirnov S.V.* // Opt. Express. 2006. V. 14. P. 3968.
6. *Lee J.H., Han Y.-G., Lee S.* // Opt. Express. 2006. V. 14. P. 3443.
7. *Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fateev N.V.* // Quant. Electron. 2002. V. 32. P. 11.
8. *Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Smirnov S.V.* // Laser Phys. 2008. V. 18. № 11. P. 1257.
9. *Dudley J.M., Coen S.* // Opt. Lett. 2002. V. 27. P. 1180.
10. *Dudley J.M., Coen S.* // IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron. 2002. V. 8. P. 651.
11. *Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fateev N.V., Smirnov S.V.* // Appl. Phys. B. 2005. V. 81. P. 265.
12. *Vanholsbeeck F., Martin-Lopez S., Gonzalez-Herraez M., Coen S.* // Opt. Express. 2005. V. 13. P. 6615.
13. *Abeeluck A.K., Headley C., Jørgensen C.G.* // Opt. Lett. 2004. V. 29. P. 2163.
14. *Hasegawa A.* // Opt. Lett. 1984. V. 9. P. 288.
15. *Tai K., Tomita A., Jewell J.L., Hasegawa A.* // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 49. P. 236.
16. *Fatome J., Pitois S., Millot G.* // IEEE J. Quant. Electron. 2006. V. 42. P. 1038.
17. *Kobtsev S.M., Smirnov S.V.* // Laser Phys. 2008. V. 18. P. 1264.
18. *Kobtsev S.M., Smirnov S.V.* // Opt. Express. 2008. V. 16. P. 7428.
19. *Agrawal G.P.* Nonlinear Fiber Optics. San Diego: Academic Press, 2001.