

Исследование продольного распределения генерируемой мощности в волоконном ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью и с односторонней накачкой

Д.В.Чуркин, А.Е.Эль-Тахер, И.Д.Ватник, С.А.Бабин

Измерено продольное распределение мощности стоковой компоненты в волоконном ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью и с односторонней накачкой. По полученным распределениям вычислены параметры волокна – линейные потери и коэффициент обратного рэлеевского рассеяния. Построена численная модель, описывающая распределение мощности генерации. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: ВКР-лазер, случайная обратная связь, рэлеевское рассеяние, волоконный световод.

1. Введение

Необходимая для генерации положительная обратная связь в лазере обычно осуществляется с помощью резонатора, однако существуют и другие возможности. Еще в 1966 г. [1] была продемонстрирована генерация за счет нерезонансной обратной связи – одно из зеркал резонатора рубинового лазера было заменено диффузным рассеивателем. Затем был предложен и теоретически исследован [2] лазер, в котором случайно распределенные по пространству рассеиватели обладали отрицательным поглощением. Такая схема впоследствии получила название «случайный лазер» и привлекла к себе большое внимание исследователей. За прошедшее время рассмотрено множество вариантов случайных лазеров с обратной связью, осуществляемой в результате многократного рассеяния генерируемых фотонов на частицах, случайным образом распределенных в усиливающей среде [3]. Недавно концепция случайной обратной связи была реализована в волоконных лазерах [4]. В длинном (84 км) волоконном световоде вследствие вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) создавалось распределенное усиление, а обратная связь осуществлялась в результате обратного рэлеевского рассеяния на случайно распределенных по сердцевине волокна флуктуациях плотности. Поскольку в структуре кварцевого стекла с легирующими примесями, из которого состоит сердцевина световода, неизбежно присутствуют случайные флуктуации субмикронного масштаба, для создания «случайного» волоконного ВКР-лазера достаточно использовать стандартные телекоммуникационные волокна.

Д.В.Чуркин. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: churkin@iae.nsk.su

А.Е.Эль-Тахер. Photonics Research Group, Aston University, Birmingham, B4 7ET, UK; e-mail: eltaheae@aston.ac.uk

И.Д.Ватник, С.А.Бабин. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: ilya.vatnik@gmail.com, babin@iae.nsk.su

Поступила в редакцию 4 июля 2012 г.

К настоящему моменту достигнут заметный прогресс как в создании новых вариантов волоконных лазеров на основе данного принципа, так и в описании и понимании механизмов их работы. В частности созданы непрерывные узкополосные ВКР-лазеры со случайной распределенной обратной связью на рэлеевском рассеянии, работающие в областях 1.55 [4, 5] и 1.2 мкм [6], а также многоволновые [7, 8] и перестраиваемые [9, 10] лазеры. Описаны их спектральные свойства [11].

Особый интерес представляет продольное распределение мощности генерации в таких лазерах. Оно принципиально отличается от распределения мощности в ВКР-лазерах с обычным линейным резонатором с точечными отражателями (зеркалами), расположенными на концах световода, и важно как для понимания механизмов случайной генерации, так и для потенциальных применений таких лазеров в телекоммуникационных и сенсорных системах. В недавней работе [12] экспериментально и теоретически исследовано продольное распределение генерируемой мощности в самой простой для рассмотрения симметричной конфигурации, впервые реализованной в [4]. Для этого использовались два лазера накачки, излучение которых вводится в середину отрезка волокна и распространяется в противоположных направлениях из середины к концам отрезка. В этом случае коэффициент ВКР-усиления максимален в середине световода и в равной степени уменьшается к его концам, а максимум мощности генерации достигается в точке $|z| = L_{RS}$, где усиление снижается до уровня потерь. В такой системе симметрия для встречных генерируемых волн наблюдается при отражении относительно середины [12]. Другой базовой конфигурацией случайного лазера является несимметричная конфигурация с одним лазером накачки, излучение которого вводится в один из торцов волоконного световода. Очевидно, что распределение мощности генерации в системе с односторонней накачкой должно существенно отличаться от распределения в симметричной системе, однако до настоящего времени оно не исследовалось.

В данной работе мы проводим детальное экспериментальное исследование продольного распределения генерируемой мощности в волоконном ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью в различных конфигурациях с одним лазером накачки. На основании экспери-

ментальных данных найден реальный коэффициент обратного рэлеевского отражения и линейные потери в волокне. Проведен численный расчет продольных распределений мощности на основе системы балансных уравнений, получено хорошее согласие с экспериментальными данными.

2. Экспериментальная установка

Для экспериментального исследования продольного профиля генерации была собрана следующая схема ВКР-лазера со случайной обратной связью. В качестве усиливающей среды со случайно распределенными неоднородностями использовался отрезок стандартного телекоммуникационного волокна SMF-28 длиной 84 км, сваренный из девяти кусков разной длины. С помощью спектрально-селективного ответвителя излучение лазера накачки на длине волны 1455 нм вводилось с левого края системы (рис.1,*а*) либо в ее центр (рис.1,*б*).

Порог генерации в обеих схемах составлял ~1.6 Вт, что хорошо согласуется с предыдущими экспериментальными результатами и теоретическими оценками [4, 12]. Генерация в такой схеме наблюдалась в области максимума коэффициента ВКР-усиления (около 1555 нм), ширина спектра генерации зависела от мощности и была равна ~1 нм.

В каждый промежуток между отдельными кусками волокна и к обоим выходам лазера последовательно приваривался измерительный модуль, состоящий из 1%-ного ответвителя, спектрально-селективного ответвителя 1455/1550 (ССО), и оптического изолятора (ОИ). Мощность стоксовой волны измерялась с помощью модуля без внесения паразитных отражений в систему. Измерительный модуль устанавливался поочередно в двух направлениях – для измерения мощности волн, распространяющихся как вправо, так и влево.

Для увеличения количества точек в распределении, после измерения мощности в каждом из восьми промежутков между волокнами, изменялось направление распространения волны накачки, а затем измерения в каждой точке повторялись. Поскольку длины каждого из девяти кусков были неодинаковыми, такое симметричное отражение системы относительно ее центра приводило к удвоению количества данных.

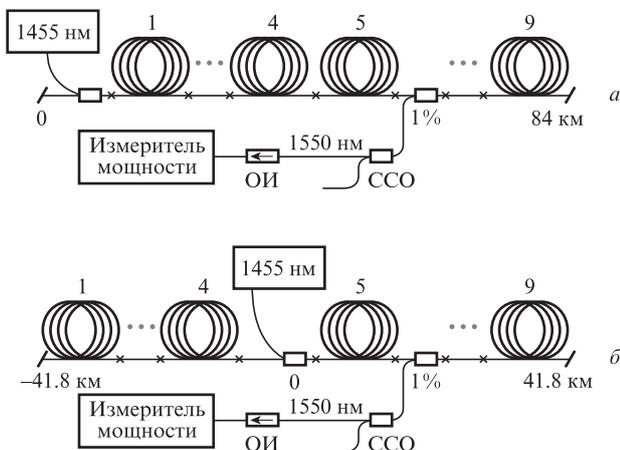


Рис.1. Экспериментальная установка: схема с односторонней накачкой (*а*) и схема с накачкой в середине (*б*); ССО – спектрально-селективный ответвитель 1455/1550, ОИ – оптический изолятор.

3. Результаты измерений

Измеренные продольные распределения мощности для схемы с односторонней накачкой (рис.1,*а*) представлены на рис.2. Они качественно отличаются от распределений, наблюдаемых в симметричной конфигурации [12]. Волна, сонаправленная с волной излучения накачки, имеет пологое распределение, что хорошо видно в линейном масштабе (рис.2,*б*). Максимум распределения отстоит от лазера накачки на длину усиления L_{RS} и находится в точке, в которой потери волны генерации равны ее усилению [4]. Обратная волна испытывает резкий рост в области торца волокна, где мощность накачки максимальна. Отметим, что мощность обратной (противонаправленной волне накачке) волны возрастает на пять порядков за проход по волокну, тогда как мощность сонаправленной с волной накачки волны генерации гораздо более равномерна и изменяется менее чем на порядок.

Дальнейшие исследования проводились с лазером другой экспериментальной конфигурации. В ней точка ввода излучения накачки сдвинута в центр отрезка волокна на 42 км от его начала (см. рис.1,*б*). В такой конфигурации в левой половине резонатора волна накачки полностью отсутствует, что позволяет, как мы увидим далее, независимым образом определить оптические потери и, что более важно, определить коэффициент обратного рэлеевского рассеяния – отношение рассеянной назад и захватываемой волокном мощности к полной рассеянной мощности.

В данной конфигурации продольные распределения мощности встречных волн (рис.3) становятся более симметричными по сравнению с распределениями для одно-

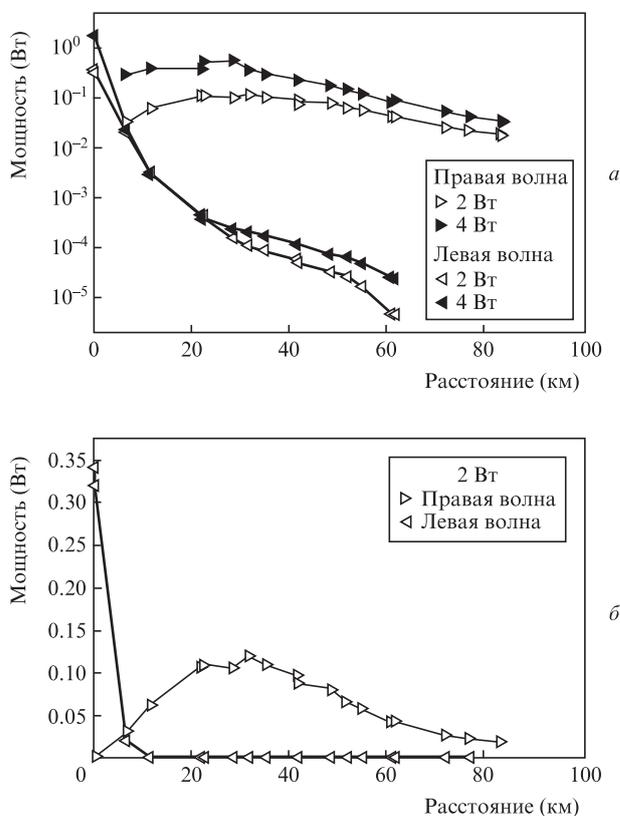


Рис.2. Продольные распределения мощности в схеме с односторонней накачкой с левого края при мощности накачки 2 и 4 Вт (*а*) и 2 Вт в линейном масштабе (*б*).

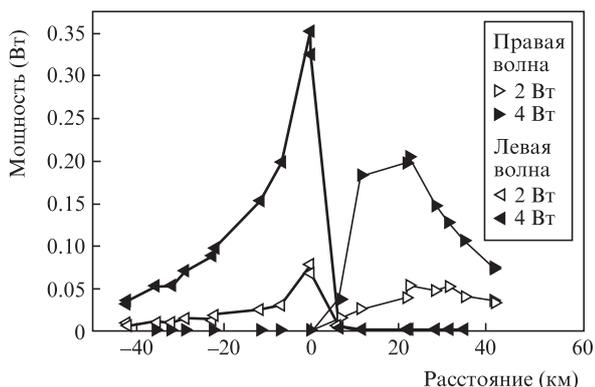
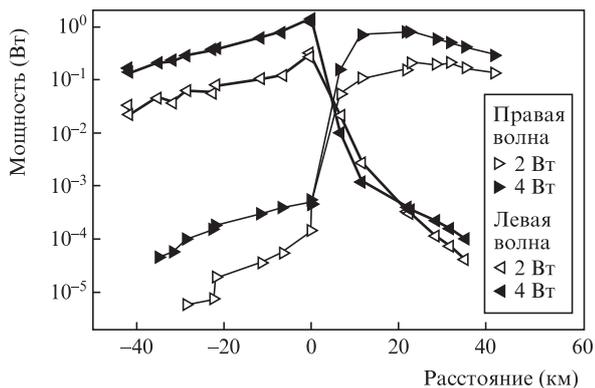


Рис.3. Продольные распределения мощности в конфигурации, когда излучение накачки вводится из центра волокна, в логарифмическом (а) и в линейном (б) масштабах.

сторонней накачки с левого края, представленными на рис.2. Но при этом они менее симметричны, чем распределения в полностью симметричной схеме с двумя источниками накачками [12]. Действительно, в левой половине лазера, хотя в ней и отсутствует излучение накачки, распространяется мощная обратная стоксова волна, которая, испытывая обратное рэлеевское рассеяние, обеспечивает затравку для прямой стоксовой волны. Таким образом, генерация прямой волны оказывается более эффективной, чем в предыдущей схеме: мощность в максимуме распределения при мощности накачки 4 Вт составляет 1 Вт против мощности в максимуме 0.5 Вт, достигаемой в случае накачки с торца волокна. При этом, однако, уменьшается максимальная мощность генерируемой обратной волны – 1.4 Вт в схеме с накачкой с середины отрезка волокна против 2 Вт в схеме с накачкой с торца. Данный факт является важным для практических применений.

Интересно проследить поведение положения максимума мощности прямой волны генерации, который характеризует длину усиления L_{RS} в исследуемой системе. При увеличении мощности накачки максимум должен приближаться к точке ввода излучения накачки ввиду его истощения из-за генерации стоксовой компоненты. В работе [12] аналитически получен и экспериментально подтвержден закон такого смещения для симметричной двухплечевой конфигурации: длина усиления L_{RS} обратно пропорциональна мощности накачки. Из измеренных продольных распределений мы извлекли зависимость длины усиления L_{RS} от мощности накачки P в случае односторонней накачки (рис.4). В такой схеме L_{RS} уменьшается медленнее: найденный феноменологический закон спада имеет вид $P^{-0.7}$. Этот факт может оказаться важным с прак-

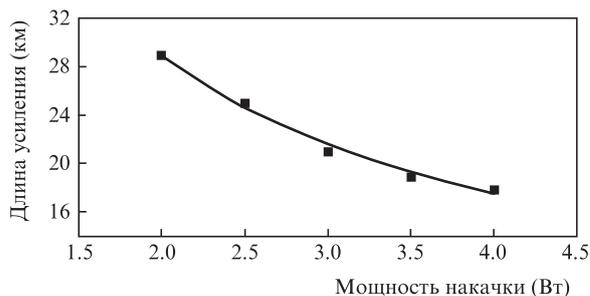


Рис.4. Зависимость длины усиления L_{RS} от мощности накачки; точки – эксперимент, кривая – аппроксимация степенным законом $P^{-0.7}$.

тической точки зрения. Действительно, уменьшение L_{RS} до значений, меньших длины волокна, приводит к потере выходной мощности, поскольку при $z > L_{RS}$ происходит экспоненциальное падение мощности генерации. Рост мощности накачки приводит к дальнейшему смещению точки L_{RS} к точке ввода накачки и к увеличению отрезка волокна, в котором стоксова волна испытывает лишь линейные потери. Тем самым выходная эффективность лазера снижается. Чем медленнее спадает L_{RS} с ростом мощности накачки, тем больше эффективность генерации.

4. Расчет оптических потерь и коэффициента обратного рассеяния

Зная распределение мощности в конфигурации, в которой одна волна накачки вводится в центр схемы (рис.1,б), можно определить некоторые параметры волокна. Действительно, в левом плече ввиду отсутствия волны накачки обратная волна с мощностью P_S^- испытывает лишь экспоненциальное затухание, при этом показатель экспоненты α_S определяется оптическими потерями в волокне:

$$P_S^-(z < 0) = P_S^-(z = 0) \exp(z\alpha_S). \tag{1}$$

Здесь z – координата вдоль волокна, отсчитываемая от места ввода излучения накачки и растущая при движении вправо. Полученное из аппроксимации экспериментальных данных (рис.5, верхняя кривая) значение оптических потерь α_S составляет 0.058 км^{-1} , что согласуется с данными производителя ($\alpha_S = 0.045 \text{ км}^{-1}$).

Далее по измеренному распределению мощности стоксовой волны в левом плече можно найти коэффициент

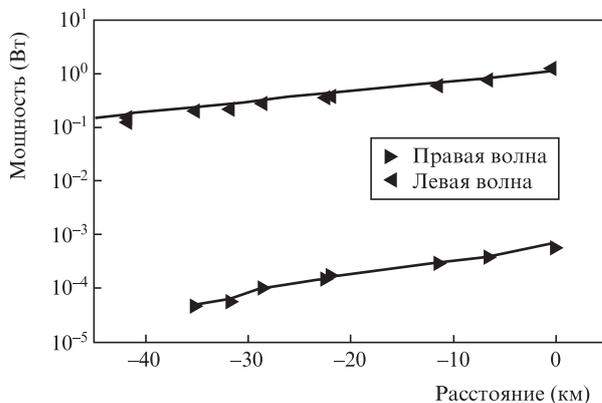


Рис.5. Распределения мощности правой и левой волн в участке волокна без усиления; точки – эксперимент, кривые – расчет по формулам (1) и (2).

обратного рэлеевского рассеяния Q – параметр, определяемый геометрическими размерами волокна и равный отношению мощности излучения, рассеянного в обратном направлении и каналируемого световодом, к мощности излучения, рассеянного в телесный угол 4π . Действительно, мощность прямой волны P_S^+ , возникающей в левом плече из обратной волны P_S^- за счет рэлеевского рассеяния назад, описывается выражением

$$P_S^+(z + L) = \frac{1}{2} Q P_S^-(z + L) \{1 - \exp[-2\alpha_S(z + L)]\}. \quad (2)$$

Здесь $L = 41.8$ км – полная длина плеча. Таким образом, можно рассчитать продольное распределение прямой волны в левом плече, используя коэффициент обратного рэлеевского отражения как свободный параметр. При $Q = 1.05 \times 10^{-3}$ достигается наилучшее согласие экспериментальных данных и результатов аналитического расчета (рис.5, нижняя кривая). Заметим, что предоставленная производителем информация об обратном рэлеевском факторе, равном 82 дБ ($Q = 7 \times 10^{-4}$), несколько отличается от полученной нами в эксперименте.

5. Численная модель

Продольное распределение мощности всюду внутри лазера можно рассчитать, если воспользоваться хорошо известной системой балансных уравнений, описывающей мощность генерации в волоконном ВКР-лазере [13]:

$$(\alpha_P + d/dz)P_P^+ = -g_S P_P^+(P_S^+ + P_S^- + 4h\nu_S \Delta\nu) \nu_P / \nu_S,$$

$$(\alpha_S \pm d/dz)P_S^\pm = g_S P_P^+(P_S^\pm + 2h\nu_S \Delta\nu) + \varepsilon_S P_S^\mp.$$

Здесь индексы P и S обозначают накачку и стоксову компоненту соответственно; индексы «+» и «-» отвечают прямой и обратной волнам; ν_i – частота; $\Delta\nu$ – ширина спектра усиления, составляющая несколько десятков нанометров; α_i и g_S – потери и коэффициент ВКР-усиления соответственно. Коэффициент обратного рэлеевского рассеяния $\varepsilon_S = \alpha_i Q$ учитывает обратную связь за счет рэлеевского рассеяния, в результате которой правая и левая волны перемешиваются. Граничные условия, соответствующие схеме с накачкой в середине волокна, выглядят следующим образом:

$$P_P(0) = P_0, \quad P_S^+(0) = R_L P_S^-(0), \quad P_S^-(L) = 0.$$

Здесь P_0 – мощность лазера накачки; $R_L = \frac{1}{2} Q [1 - \exp(-2\alpha_S L)] = 5 \times 10^{-4}$ – интегральный коэффициент отражения рэлеевского зеркала, образованного левым плечом системы. Распределения в левом плече восстанавливались по формулам (1) и (2). Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными (рис.6, сплошная кривая).

Как уже было указано выше, присутствие левого плеча является существенным, несмотря на малый коэффициент отражения образующегося рэлеевского зеркала R_L . Действительно, если положить $R_L = 0$ (т.е. изъять из системы левое плечо), то распределение мощности значительно изменится (рис.6, штриховая кривая) и перестанет согласовываться с экспериментальными данными.

Таким образом, в отличие от одноплечевой схемы конфигурация с одной точкой накачки в середине приводит

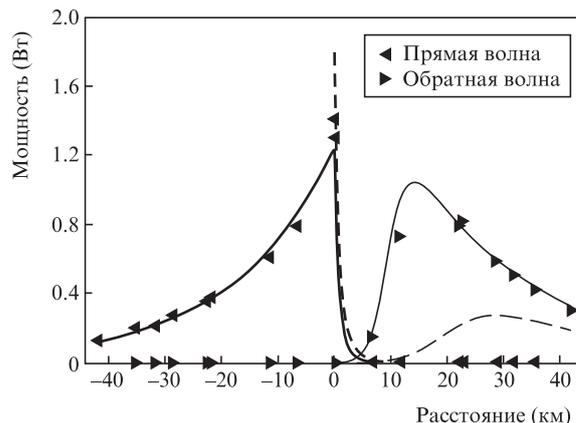


Рис.6. Сравнение численной и экспериментальной моделей: точки – эксперимент, сплошные кривые – численный расчет с учетом случайно распределенной обратной связи в левом плече, штриховые кривые – без ее учета; $R_L = 0$.

к большим мощностям прямой волны и к меньшим – обратной.

6. Заключение

Экспериментально и численно исследованы распределения мощности в одноплечевой схеме ВКР-лазера со случайно распределенной обратной связью. На основании измеренных распределений вычислен такой параметр волокна, как коэффициент обратного рэлеевского рассеяния. Балансная модель хорошо описывает распределения, несмотря на то что она не учитывает ни дисперсионные, ни нелинейные эффекты, которые, по всей видимости, играют в формировании спектра случайного ВКР-лазера, как и обычного волоконного ВКР-лазера, существенную роль [14]. Отметим, что знание продольных распределений мощности позволит оптимизировать параметры лазера для его дальнейших применений, например в качестве распределенного усилителя оптического сигнала.

1. Амбарцумян Р.В., Басов Н.Г., Крюков П.Г., Летохов В.С. *ЖЭТФ*, **51**, 724 (1966).
2. Летохов В.С. *ЖЭТФ*, **53**, 1442 (1967).
3. Wiersma D.S. *Nat. Phys.*, **4** (5), 359 (2008).
4. Turitsyn S.K., Babin S.A., El-Taher A.E., Harper P., Churkin D.V., Kablukov S.I., Ania-Castañón J.D., Karalekas V., Podivilov E.V. *Nat. Photon.*, **4**, 231 (2010).
5. Churkin D.V., Babin S.A., El-Taher A.E., Harper P., Kablukov S.I., Karalekas V., Ania-Castañón J.D., Podivilov E.V., Turitsyn S.K. *Phys. Rev. A*, **82** (3), 033828 (2010).
6. Vatnik I.D., Churkin D.V., Babin S.A., Turitsyn S.K. *Opt. Express*, **19** (19), 18486 (2011).
7. Pinto A.M.R., Frazao O., Santos J.L., Lopez-Amo M. *Appl. Phys. B*, **99** (3), 391 (2010).
8. El-Taher A.E., Harper P., Babin S.A., Churkin D.V., Podivilov E.V., Ania-Castanon J.D., Turitsyn S.K. *Opt. Lett.*, **36** (2), 130 (2011).
9. Babin S.A., El-Taher A.E., Harper P., Podivilov E.V., Turitsyn S.K. *Phys. Rev. A*, **84** (2), 021805 (2011).
10. Sarmani A., Zamiri R., Bakar M.H.A., Azmi B., Zaidan A., Mahdi M.A. *J. Europ. Opt. Soc. Rapid Publ.*, **6**, 11043 (2011).
11. Sarmani A., Abu Bakar M., Bakar A., Adikan F., Mahdi M.A. *Opt. Express*, **19** (15), 14254 (2011).
12. Churkin D.V., El-Taher A.E., Vatnik I.D., Ania-Castañón J.D., Harper P., Podivilov E.V., Babin S.A., Turitsyn S.K. *Opt. Express*, **20** (10), 11178 (2012).
13. Headley C., Agrawal G.P. *Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems* (Oxford: Elsevier, 2005).
14. Babin S.A., Churkin D.V., Ismagulov A.E., Kablukov S.I., Podivilov E.V. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24** (8), 1729 (2007).