

Простой метод измерения эффективного коэффициента ВКР в одномодовых волоконных световодах и область его применимости

И.И.Шихалиев, В.В.Гайнов, А.Н.Дорожкин, О.Е.Наний, В.А.Коньшев, В.Н.Трещиков

Описаны методики измерения коэффициента ВКР в широком спектральном диапазоне, включая область малых стоксовых сдвигов. Предложен простой приближенный метод оценки коэффициента ВКР вблизи пика усиления. Приведены спектральные зависимости коэффициента ВКР для различных телекоммуникационных волокон.

Ключевые слова: комбинационное рассеяние, коэффициент ВКР, ВКР-усилитель, ВКР-перекос, волоконно-оптическая линия связи.

1. Введение

Применение распределенных усилителей на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР-усилителей) совместно с традиционными эрбиевыми усилителями позволяет существенно улучшить отношение сигнал/шум в многопролетных и однопролетных волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) [1–4] за счет уменьшения уровня шума усиленного спонтанного излучения и ослабления нелинейных искажений.

В последнее время интерес к использованию ВКР-усилителей существенно возрос в связи с началом использования многоуровневых форматов модуляции QAM16, QAM64 и даже QAM256, для работы которых требуется существенно более высокое значение отношения сигнал/шум оптического сигнала. Стоит также отметить важность традиционного применения ВКР-усилителей и лазеров для расширения спектрального диапазона волоконных лазерных источников излучения.

Для расчета характеристик такого усилителя важнейшим параметром является коэффициент ВКР g_R , определяющийся характеристиками световода, в котором реализуется ВКР-усиление.

И.И.Шихалиев, В.В.Гайнов, А.Н.Дорожкин. Научно-технический центр Т8, Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатая, 44, стр.1, оф.830; e-mail: shikhaliev@t8.ru

О.Е.Наний. Научно-технический центр Т8, Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатая, 44, стр.1, оф.830; Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; e-mail: naniy@t8.ru

В.А.Коньшев. Научно-технический центр Т8, Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатая, 44, стр.1, оф.830; Институт истории естествознания и техники им. С.И.Вавилова РАН, Россия, 125315 Москва, ул. Балтийская, 14

В.Н.Трещиков. Научно-технический центр Т8, Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатая, 44, стр.1, оф.830; Филиал института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1

Поступила в редакцию 18 апреля 2017 г., после доработки – 13 июля 2017 г.

Предложено несколько способов измерения спектральной зависимости коэффициента ВКР от частотной расстройки (стоксова сдвига). Данная зависимость может быть получена из спектральной зависимости коэффициента усиления слабого сигнала (как для источника, перебираемого по длине волны, так и для широкополосного), распространяющегося навстречу накачке [5–7], или из спектра излучения усиленного спонтанного комбинационного рассеяния (УСКР) [5, 8]. Преимуществом первого способа является простота расчета коэффициента ВКР из коэффициента усиления (КУ) слабого сигнала, связанных известным соотношением [9]. Однако для экспериментального исследования в этом случае необходим источник сигнала в исследуемом диапазоне длин волн.

Достоинством второго метода является возможность проведения измерений при доступе только к одному концу волокна. Это достоинство проявляется особенно сильно при необходимости измерения коэффициентов ВКР-усиления проложенных телекоммуникационных волокон в действующих линиях связи при переходе на многоуровневые форматы модуляции для увеличения пропускной способности линии.

В настоящей работе показано, что методика измерения коэффициента ВКР-усиления по спектрам УСКР обеспечивает достаточную точность для использования этих коэффициентов при измерении кабельной инфраструктуры действующих волоконно-оптических линий связи. Кроме того, данная методика позволяет измерять коэффициент ВКР в широком спектральном диапазоне, а также с высокой точностью оценивать его значение в области малых стоксовых сдвигов для учета межканального ВКР-перекоса в линиях связи с плотным спектральным уплотнением (DWDM), чего не было предложено ранее другими авторами. Рассмотрен простой приближенный метод оценки коэффициента ВКР вблизи пика усиления с целью диагностики и сравнения различных волокон по этому параметру.

На основе описываемой методики проведены измерения и представлены спектры коэффициентов ВКР-усиления новых типов волокон, используемых в волоконно-оптических линиях связи.

2. Схема и методика измерения коэффициента ВКР-усиления по спектрам УСКР

Схема эксперимента по измерению спектра излучения УСКР, распространяющегося навстречу излучению накачки, изображена на рис.1. В исследуемое волокно длиной L вводится излучение накачки. С помощью направленного 1%-ного ответвителя контролируется мощность накачки на входе в волокно, а также спектр излучения УСКР, распространяющегося в обратном направлении. Для корректного измерения спектров коэффициента ВКР в протяженных изотропных волоконных световодах необходимо использование деполаризованного источника накачки. В наших экспериментах использовалось излучение волоконного ВКР-лазера с длиной волны 1480 нм либо излучение двух полупроводниковых лазеров с той же длиной волны, объединяемое с помощью поляризационного мультиплексора. Измеренные спектры УСКР при одинаковой суммарной мощности при этом оказываются идентичными.

Для определения того, как связаны между собой спектры УСКР и спектральная зависимость коэффициента ВКР, рассмотрим модель ВКР-усиления в одномодовых волоконных световодах.

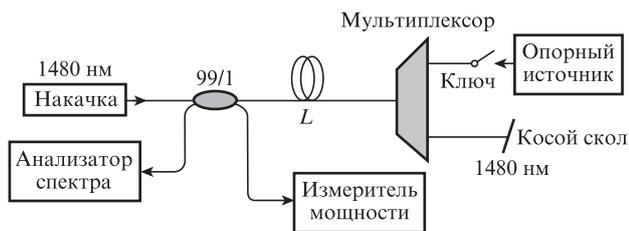


Рис.1. Схема измерения коэффициента ВКР по спектрам УСКР. При замыкании ключа получается схема измерения с опорным источником.

3. Расчетная модель

В общем случае взаимодействие излучений накачки и сигнала в ВКР-усилителе подчиняется системе связанных скоростных дифференциальных уравнений (СДУ), описывающих эволюцию при распространении вдоль оптического волокна соответствующих интенсивностей или мощностей [9, формула (4.6)]. Сделав соответствующие замены, можно переписать СДУ в виде уравнений для плотностей фотонов накачки и сигнала:

$$\frac{dn_s}{dz} = \gamma n_p (n_s + n_{\text{spont}}) - \alpha_s n_s, \quad (1)$$

$$\frac{dn_p}{dz} = \gamma n_p (n_s + n_{\text{spont}}) - \alpha_p n_p,$$

где n_s и n_p – плотности числа фотонов сигнала и накачки соответственно; γ – коэффициент ВКР, приведенный к размерности $[\text{м}^{-1}]$; α_s и α_p – коэффициенты затухания сигнала и накачки; n_{spont} – коэффициент спонтанного рассеяния, зависящий от стоксового сдвига:

$$n_{\text{spont}} = 1 + \Theta(\Delta\nu) = 1 + \left[\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{k_B T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (2)$$

(h – постоянная Планка, k_B – постоянная Больцмана, T – температура, $\Delta\nu$ – частотный сдвиг между излучением сигнала и накачки, $\Theta(\Delta\nu)$ – среднее число фотонов в термодинамически равновесном состоянии при температуре T , или коэффициент Бозе–Энштейна).

Для записи СДУ (1) в единицах мощности [9] необходимо воспользоваться заменой

$$\gamma n_p \rightarrow g_R P_p, \quad (3)$$

где P_p – мощность накачки; g_R – коэффициент ВКР, приведенный к размерности $[\text{м}^{-1} \cdot \text{Вт}^{-1}]$.

В приближении слабого сигнала слагаемым, содержащим n_s , во втором уравнении системы (1) можно пренебречь. В этом случае решение принимает вид

$$n_s(L) = n_s(0) G_{\text{eff}} \exp(-\alpha_s L) + n_n, \quad (4)$$

где $G_{\text{eff}} = \exp(\gamma n_p^L L_{\text{eff}})$ – эффективный коэффициент усиления; n_n – число шумовых фотонов;

$$n_n = n_{\text{spont}} \left(\frac{\alpha_p}{\gamma n_p^L} \right)^{\alpha_s/\alpha_p} \exp\left(\frac{\gamma n_p^L}{\alpha_p}\right) \times \left[\Gamma\left(1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}, \frac{\gamma n_p^L}{\alpha_p} \exp(-\alpha_p L)\right) - \Gamma\left(1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}, \frac{\gamma n_p^L}{\alpha_p}\right) \right]; \quad (5)$$

n_p^L – число фотонов накачки на входе в волокно (навстречу сигналу); $\Gamma(a, x)$ – неполная гамма-функция; L – длина волокна; $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_p L)]/\alpha_p$ – эффективная длина волокна.

Спектральная плотность мощности УСКР связана с числом фотонов соотношением

$$\frac{\delta P_{\text{ASRE}}}{\delta \nu} = n_n h \nu, \quad (6)$$

где ν – частота излучения.

Используя соотношения (5) и (6), коэффициент ВКР можно определить численным методом.

Если воспользоваться приближением, что излучение УСКР – малый сигнал, то согласно формуле (4) величину коэффициента ВКР можно оценить с помощью простого соотношения:

$$\Delta S [\text{дБ}] = 4.34 g_R L_{\text{eff}} \Delta P_0, \quad (7)$$

где ΔS – разность спектров УСКР для двух значений мощности накачки, отличающихся на ΔP_0 . Границы применимости данного приближения рассмотрены ниже.

4. Область применимости приближения усиленного спонтанного комбинационного рассеяния слабым сигналом

Проанализируем выражение для числа шумовых фотонов (5). Введем обозначения $t = \gamma n_p^L / \alpha_p$, $A = \alpha_s / \alpha_p$. Прологарифмировав выражение (5), с учетом этих обозначений получим

$$\ln n_n - \ln n_{\text{spont}} = -A \ln t + t + \ln[\Gamma(1 + A, t \exp(-\alpha_p L)) - \Gamma(1 + A, t)]. \quad (8)$$

При $n_p^L \rightarrow \infty$ имеем $t \rightarrow \infty$ и получаем [10]:

$$\begin{aligned} \Gamma(1 + A, t \exp(-\alpha_p L)) &\gg \Gamma(1 + A, t), \Gamma(a, t) \rightarrow \exp(-t)t^a, \\ \ln(n_n/n_{\text{spont}}) &= -A \ln t + t + \ln \{t \exp(-\alpha_p L)\} \\ &\times \exp[-t \exp(-\alpha_p L)] = t[1 - \exp(-\alpha_p L)] - \alpha_s L \\ &= \ln G_{\text{eff}} - \alpha_s L. \end{aligned} \tag{9}$$

Формула (9) есть асимптотическое приближение формулы (5) при мощности накачки, стремящейся к бесконечности, что эквивалентно выражению (7).

Поскольку коэффициент ВКР в данном методе вычисляется из разности двух спектров УСКР для двух различных мощностей накачки, то для оценки погрешности измерения необходимо вычислить погрешность производной мощности излучения (или числа фотонов) по эффективному КУ.

Проанализируем модуль производной функции $\ln n_n$ по $\ln G_{\text{eff}}$ для числа шумовых фотонов n_n (5), полученной из точного решения, при различных значениях полного поглощения $\alpha_s L$ на длине световода (рис.2).

Приведенный график характеризует погрешность измерения коэффициента ВКР по разности спектров УСКР. Из рис.2 следует, что при малых значениях $\alpha_s L$ световода ($\alpha_s L < 0.5$) погрешность измерения g_R составляет не более 1%, но при этом требуется обеспечить достаточно большое значение эффективного коэффициента усиления (более 17 дБ). При больших значениях $\alpha_s L$ ($L \gg L_{\text{eff}}$) погрешность вычисления коэффициента ВКР возрастает (сплошная кривая на рис.2).

На рис.3 представлены результаты измерений коэффициента ВКР в эксперименте с волокном G652.D Corning SMF-28 длиной 27.9 км. В настоящей работе мы сравниваем спектральные зависимости коэффициента ВКР, полученные несколькими способами. Во-первых, с помощью точного решения для числа шумовых фотонов (5) и спектра УСКР численным методом (кривая 1 на рис.3). Во-вторых, используя приближенное решение для числа шумовых фотонов (9), по разности спектров УСКР при двух

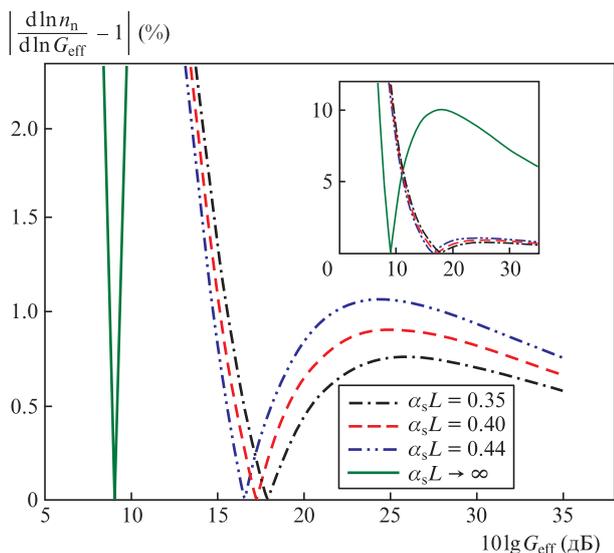


Рис.2. Модуль производной функции $\ln(n_n/G_{\text{eff}})$ по $\ln G_{\text{eff}}$ при различных значениях потерь $\alpha_s L$ на длине световода L . На вставке показана эта же зависимость в уменьшенном масштабе.

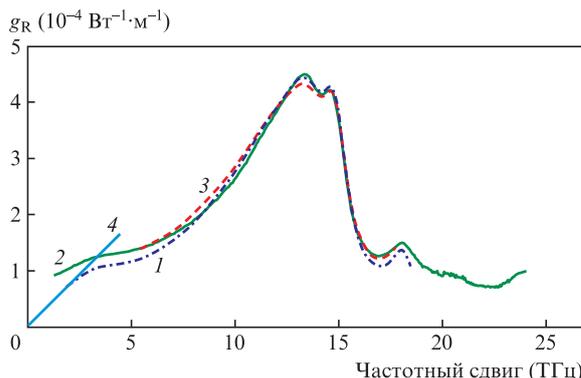


Рис.3. Зависимости коэффициента ВКР от частотного сдвига, полученные по спектрам УСКР ВКР-усилителя с помощью точного решения (5) (1), по спектрам УСКР приближенным методом (2), по измерениям КУ опорного источника (3) и прямое измерение ВКР-перекоса [11] (4).

различных мощностях накачки (кривая 2 на рис.3). Как видно из графика, на краях зависимости коэффициента ВКР от частотного сдвига наблюдается расхождение кривых, полученных с помощью точного решения и приближенного, что объясняется малым эффективным КУ в данной области, т.е. в области, где приближенное решение не применимо. В-третьих, дополнительно проведено сравнение с результатами измерений коэффициента усиления слабого сигнала с помощью опорного источника (кривая 3 на рис.3).

Основным ограничением, определяющим область применимости приближенного метода для измерения коэффициента ВКР, в данном случае является достижение так называемого порога двойного рэлеевского рассеяния [9], которое приводит к возникновению лазерной генерации с распределенной случайной обратной связью. Это вызывает искажение спектра УСКР и ограничение максимально допустимого КУ в эксперименте. Пороговая величина эффективного коэффициента ВКР-усиления определяется коэффициентом обратного рэлеевского рассеяния ($4.5 \times 10^{-5} \text{ км}^{-1}$) и для стандартного волокна составляет примерно 46 дБ [12]. Масштабируя максимум графика на рис.3 к этому значению, получаем, что по упомянутому выше оценочному уровню 17 дБ коэффициент ВКР может быть измерен приближенным методом с требуемой точностью в диапазоне стоксовых сдвигов не шире, чем 7.5–16 ТГц. Разумеется, данная численная оценка справедлива только для волокон со сходным химическим составом сердцевин, для других типов волокон допустимый диапазон будет иным (к примеру, для фосфатных стекол максимумы коэффициента ВКР находятся вблизи 19.5 и 42 ТГц [13]). Для волокон же с одинаковыми потерями и составом сердцевин данная оценка не должна зависеть от типа волокна. Таким образом, полученный диапазон стоксовых сдвигов одинаков для стандартных телекоммуникационных волокон с сердцевиной, содержащей примеси германия, а также для волокон с сердцевиной из чистого кварца.

При рассмотрении эффектов нелинейного взаимодействия каналов в многоканальных ВОЛС практическое значение имеет оценка коэффициента ВКР при малых стоксовых сдвигах (менее 4 ТГц). В системах связи со спектральным уплотнением вынужденное комбинационное рассеяние приводит к усилению сигналов длинноволновых каналов за счет энергии коротковолновых каналов.

Распространенным подходом является линейное приближение спектральной зависимости коэффициента ВКР, которое позволяет вывести простое соотношение, связывающее наклон этой зависимости с перекосом многоканального спектра на выходе световода, в котором распространяется сигнал [14]:

$$\delta(\Delta p) = 4.34 \frac{dg_R}{dv} \Delta \Omega L_{\text{eff}} P_s^0, \tag{10}$$

где $\delta(\Delta p)$ (в дБ) – нелинейная добавка к межканальному перекосу, определяемому как разность мощностей между крайними спектральными компонентами сигнала; dg_R/dv – наклон спектральной зависимости коэффициента ВКР; $\Delta \Omega$ – полная ширина спектра сигнала; P_s^0 – суммарная входная мощность в линию.

Используя соотношение (10), можно определить величину наклона в эксперименте с прямым измерением ВКР-перекоса в линии связи [12]. Эти измерения также проводились и в настоящей работе. Прямая с полученным экспериментально коэффициентом наклона, аппроксимирующая спектральную зависимость коэффициента ВКР при малых стоксовых сдвигах, приведена на рис.3 (кривая 4). Как видно из рисунка, коэффициент наклона с хорошей точностью восстанавливается из кривой, полученной по спектрам УСКР, путем ее экстраполяции в начало координат.

5. Результаты экспериментов

Нами были проведены эксперименты по измерению коэффициента ВКР в различных телекоммуникационных волокнах (рис.4). Это волокна с германосиликатной сердцевиной и ступенчатым профилем показателя преломления Corning SMF-28 и OFS AllWave ZWP стандарта ITU-T G.652.D с эффективной площадью моды $A_{\text{eff}} = 85 \text{ мкм}^2$, волокно со смещенной ненулевой дисперсией (NZDSF, стандарт ITU-T G.655) OFS TrueWave с $A_{\text{eff}} \approx 52 \text{ мкм}^2$, а также волокна с увеличенной площадью моды (ITU-T G.654) – OFS SLA (130 мкм^2) и Corning Vascade EX2000 (112 мкм^2). Последний тип волокна представляет собой так называемый световод с сердцевиной из чистого кварца (PSCF). Данные об эффективной площади моды приведены из спецификаций на указанные типы волокон.

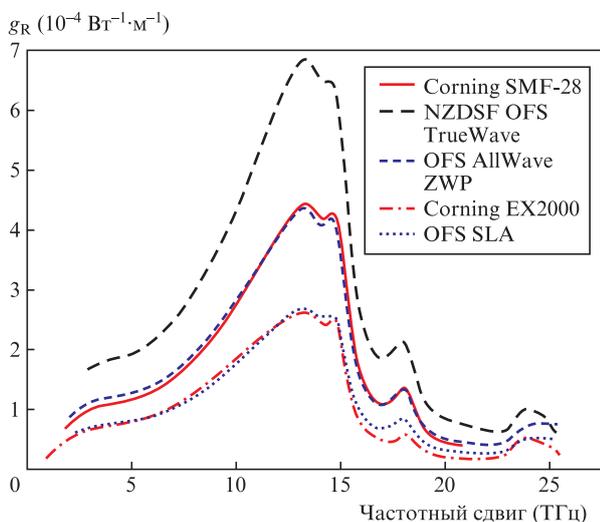


Рис.4. Зависимости коэффициента ВКР от частотного сдвига для волокон различных типов.

Табл.1. Максимальные коэффициенты ВКР для различных типов волокон (HGDF – специальное оптическое волокно с высокой концентрацией GeO₂).

| Тип волокна | Максимальный g_R ($10^{-4} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$) | Комментарий |
|--------------------|--|-------------------------------------|
| Corning SMF-28 | 4.4 | |
| NZDSF OFS TrueWave | 6.8 | Результаты настоящей работы |
| OFS AllWave ZWP | 4.3 | |
| Corning EX2000 | 2.6 | |
| OFS SLA | 2.6 | |
| HGDF | 37 | Результаты, полученные в работе [5] |
| NZDSF | 5.9 | |
| Corning LEAF | 4.8 | |

Полученные зависимости рамановских коэффициентов нормированы на эффективную площадь моды. При умножении $g_R(\Delta \nu)$ на A_{eff} для волокон с сердцевиной, содержащей примеси германия, получим схожие зависимости коэффициента ВКР от частотного сдвига. Для волокна EX2000 с сердцевиной из чистого кварца коэффициент ВКР будет меньше, чем для волокон с сердцевиной, содержащей примеси германия.

В работе [5] применялись три методики измерения коэффициентов ВКР. Первые две основаны на использовании опорных источников: широкополосного источника и перестраиваемого по длине волны узкополосного. Третья методика основана на анализе спектров УСКР. При использовании широкополосного опорного источника методы измерения в работе [5] и в настоящей работе совпадают.

Метод измерения коэффициентов ВКР на основе анализа спектров УСКР в [5] аналогичен дифференциальной методике в настоящей работе. По нашему мнению, этот метод при использовании точного выражения для числа шумовых фотонов (5) дает более высокую точность измерений, особенно в области малых отстроек от частоты накачки.

В табл.1 приведены сравнительные результаты измерения максимальных коэффициентов ВКР, полученные в настоящей работе и в работе [5]. Коэффициенты ВКР в [5] определены из выражения для эффективного КУ рамановского усилителя

$$G_{\text{on/off}} = \exp(g_R P_p L_{\text{eff}}). \tag{11}$$

6. Заключение

В настоящей работе получена формула, описывающая спектр излучения усиленного спонтанного комбинационного рассеяния в ВКР-усилителях. Предложена упрощенная методика измерения коэффициентов ВКР по спектрам УСКР и определена область ее применимости на основе сравнения с точным решением скоростных уравнений ВКР. Для большинства типов исследованных телекоммуникационных волокон область применимости данной методики соответствует диапазону стоксовых сдвигов 7.5–16 ТГц ($250\text{--}540 \text{ см}^{-1}$), в котором коэффициент ВКР может быть измерен с приемлемой точностью.

Проведенное сравнение с результатами прямого измерения ВКР-перекоса в линиях связи показало, что спектральные зависимости коэффициента ВКР, полученные с помощью обращения точного решения для спектраль-

ной плотности усиленного спонтанного комбинационного рассеяния, позволяют восстановить наклон зависимости вблизи начала координат, что имеет важное практическое значение при проектировании многоканальных линий связи как с использованием ВКР-усилителей, так и без них.

1. Bromage J. *J. Lightwave Technol.*, **22**, 79 (2004).
2. Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukin S.N., Shikhaliev I.I., Skvortsov P.I., Makovejs S., Akopov S.G., Ten S.Y., Nanii O.E. Treshchikov V.N. *Laser Phys. Lett.*, **12**, 066201 (2015).
3. Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukinykh S.N., Nanii O.E., Treshchikov V.N. *Tech. Phys.*, **60** (4), 561 (2015).
4. Phillips I.D., Tan M., Stephens M.F.C., McCarthy M., Giacoumidis E., Sygletos S., Rosa P., Fabbri S., Le S.T., Kanesan T., Turitsyn S.K., Doran N.J., Ellis A.D. *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.* (OSA, 2014, paper M3C.1).
5. Bufetov I.A., Bubnov M.M., Neustruev V.B., Mashinsky V.M., Shubin A.V., Grekov M.V., Guryanov A.N., Khopin V.F., Dianov E.M., Prokhorov A.M. *Laser Phys.*, **11** (1), 130 (2001).
6. Chang D., Pelouch W., Burtsev S., Perrier P., Fevrier H. *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.* (OSA, 2015, paper W4E.3).
7. Jiang S., Bristiel B., Jaouën Y., Gallion P. *Opt. Express*, **15** (8), 4883 (2007).
8. Stolen R.H., Lee C., Jain R.K. *J. Opt. Soc. Am. B*, **1** (4), 652 (1984).
9. Headley C., Agrawal G.P. *Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems* (London: Elsevier Acad. Press, 2005).
10. Абрамовиц М., Стиган И. *Справочник по специальным функциям* (М.: Наука, 1979).
11. Капин Ю.А., Наний О.Е., Новиков А.Г., Павлов В.Н., Плоцкий Ю.А., Трещиков В.Н. *Квантовая электроника*, **42**, 818 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 818 (2012)].
12. Turitsyn S.K., Babin A.A., El-Taher A.E., Harper P., Churkin D.V., Kablukov S.I., Ania-Castanon J.D., Karalekas K., Podivilov E.V. *Nat. Photonics*, **4**, 231 (2010).
13. Galeender F.L., Mikkelsen J.C., Geils R.H., Mosby W.J. *Appl. Phys. Lett.*, **32** (1), 34 (1978).
14. Christodoulides D.N., Jander R.B. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 1722 (1996).