

Волоконный рамановский усилитель с непрерывным спектром излучения накачки

С.М.Кобцев, А.А.Пустовских

Представлены результаты численных исследований волоконного рамановского усилителя с непрерывным спектром излучения накачки. Показана возможность получения в области 1528–1599 нм неравномерности рамановского усиления менее 0.1 дБ при среднем усилении 7.7 дБ и неравномерности 0.042 дБ в случае нулевого среднего усиления слабого сигнала в волокне SMF-28 длиной 25 км при встречной накачке с суммарной мощностью излучения 1 и 0.365 Вт соответственно. Исследованы варианты аппроксимации найденного оптимального спектра излучения накачки набором из четырех дискретных источников со спектрально-уширенными линиями излучения.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние, волоконный рамановский усилитель.

1. Введение

Волоконные усилители, в которых используется вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), представляют значительный интерес для волоконно-оптических систем связи [1]. Они выгодно отличаются от полупроводниковых усилителей и усилителей на легированном эрбием оптическом волокне принципиальной возможностью усиления на любой длине волны и использованием в качестве усиливающей среды непосредственно передающего световода; кроме того, они характеризуются относительно высоким отношением сигнал/шум, а также позволяют расширять спектральную полосу усиления за счет применения накачки с разными длинами волн [2]. Расширение рабочей спектральной полосы усилителей в современных волоконно-оптических системах связи чрезвычайно актуально в связи как с прогрессом в технологиях спектрального уплотнения каналов, так и с разработкой новых волоконных световодов, имеющих низкие оптические потери в более широкой спектральной области (например, световоды AllWave фирмы Lucent или TrueWave фирмы Corning).

При расширении рабочей спектральной полосы усилителей первоочередной задачей является обеспечение равномерности контура рамановского усиления во всей полосе усиления, что в расширенной спектральной полосе традиционно достигается увеличением числа разноволновых узкополосных источников накачки (до 12 [2] и более) и подбором длин волн и мощностей их излучения. Оптимизация длин волн и мощностей излучения накачки позволяет несколько уменьшить число источников при несущественном ухудшении основных параметров рамановских усилителей [3]. Это возможно также за счет спектрального уширения линий излучения накачки [4].

Другой подход к задаче расширения рабочей спектральной полосы рамановских усилителей, позволяющий достигнуть высокой равномерности усиления, основан на использовании одного источника накачки с быстрой перестройкой частоты излучения в широкой спектральной области [5]. Однако экспериментально этот метод пока не реализован.

Развитием методов многоволновой и спектрально-уширенной накачки рамановских усилителей явилось использование в рамановском усилителе источника накачки со сплошным спектром [6, 7]. В этом случае можно получить минимальную неравномерность контура рамановского усиления. В работе [6] при использовании ряда приближений была численно решена обратная задача поиска формы спектрального контура накачки для достижения минимально возможной неравномерности рамановского усиления в заданной спектральной области. Теоретически предсказана возможность получения неравномерности контура рамановского усиления менее 0.0025 дБ в полосе 65 нм при использовании непрерывного спектра накачки шириной 85 нм. Однако форма спектра излучения накачки, приведенная в [6], имеет относительно сложную структуру, и использование такой схемы накачки в реальных системах усиления достаточно затруднительно. В связи с этим представляет интерес поиск более простой непрерывной формы спектра излучения накачки, обеспечивающей минимально возможную неравномерность контура рамановского усиления в заданной спектральной области.

2. Численная модель и результаты исследований

Распространение сигнала и рамановское взаимодействие спектральных компонент сигнала и излучения накачки описываются системой нелинейных уравнений, поэтому аналитическое решение обратной задачи рамановского рассеяния в реалистичных моделях не представляется возможным. В связи с этим предпринятые к настоящему моменту попытки решения обратной задачи основывались либо на приближенных вариантах модели

С.М.Кобцев, А.А.Пустовских. Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: pustovs@lab.nsu.ru

Поступила в редакцию 23 октября 2003 г., после доработки – 25 февраля 2004 г.

рамановского усиления в волокне, в которых используется усреднение различных величин на определенных этапах вычислений [6], либо на поиске определенного алгоритма подбора оптимального спектра непрерывного излучения накачки рамановского усилителя [3, 7, 8].

Наряду с неравномерностью контура усиления оптического сигнала важную роль играет среднее значение усиления. Если при распределенном усилении необходимо восстановление первоначального уровня мощности сигнального излучения в конце линии передачи, то в случае точечных усилителей (или предусилителей) их эффективность определяет среднее значение усиления. Очевидно, что последнее зависит от мощности излучения накачки, однако из-за рамановского взаимодействия между спектральными компонентами излучения накачки данная зависимость нелинейна. В связи с этим для определения оптимального спектра излучения накачки при различных параметрах рамановского усилителя необходимо отдельно рассматривать каждый заданный уровень усиления.

В настоящей работе для моделирования рамановского усилителя использовалась наиболее полная численная модель [9], учитывающая основные физические процессы, оказывающие влияние на рамановское усиление, – вынужденное и спонтанное рамановское рассеяние, рэлеевское рассеяние, температурная зависимость, нелинейные взаимодействия спектральных компонент сигнала, накачки и перекрестных взаимодействий (сигнал – накачка) в обоих направлениях, а также генерация стоксовых компонент высших порядков:

$$\begin{aligned} \frac{dP_v^\pm}{dz} = & \pm \left\{ -\alpha_v P_v^\pm + \varepsilon_v P_v^\mp + P_v^\pm \left[\sum_{\mu > \nu} \frac{g_{\mu\nu}}{A_\mu} (P_\mu^\pm + P_\mu^\mp) \right. \right. \\ & - \sum_{\mu < \nu} \frac{v}{\mu} \frac{g_{\nu\mu}}{A_\mu} (P_\mu^\pm + P_\mu^\mp) - 4h\nu \sum_{\mu < \nu} \frac{g_{\mu\nu}}{A_\mu} \\ & \times \left\{ 1 + \left[\exp\left(\frac{h(\nu - \mu)}{kT}\right) - 1 \right]^{-1} \right\} \Delta\mu \left. \right\} + 2h\nu\Delta\nu \\ & \times \sum_{\mu > \nu} \frac{g_{\mu\nu}}{A_\mu} (P_\mu^\pm + P_\mu^\mp) \left\{ 1 + \left[\exp\left(\frac{h(\mu - \nu)}{kT}\right) - 1 \right]^{-1} \right\} \right\}, \end{aligned}$$

где P_v^\pm – спектральная мощность в интервале $\Delta\nu$ на частоте ν , распространяющаяся в обоих направлениях; α_v и ε_v – спектрально-зависимые коэффициенты оптических потерь и рэлеевского рассеяния в волокне; $g_{\mu\nu}$ – коэффициент рамановского усиления сигнала на частоте ν накачкой на частоте μ ; A_μ – эффективная площадь рассеяния на частоте μ ; коэффициенты 2 и 4 в членах спонтанного рамановского рассеяния появляются вследствие деполаризованности шумовых спектральных компонент при перекрестном взаимодействии сигнал – шум и шум – шум; h, k и T – постоянная Планка, константа Больцмана и температура. На рис.1 приведены спектральные зависимости коэффициента оптических потерь α и эффективной площади рассеяния A_{eff} для волокна SMF-28, использованные при численном моделировании рамановского усиления. Система уравнений дополнялась граничными условиями на обоих концах световода.

Поиск оптимального сплошного спектра излучения накачки рамановского усилителя, обеспечивающего минимальную неравномерность контура усиления, осуще-

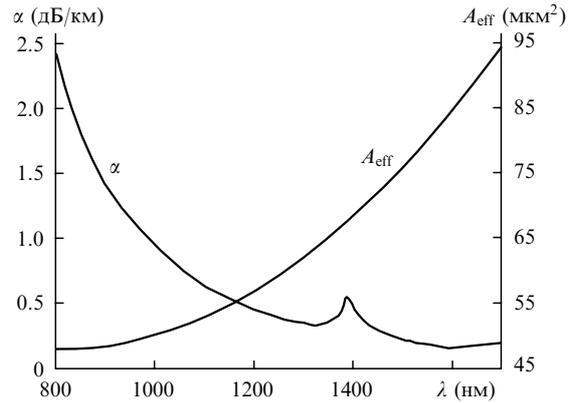


Рис.1. Спектральные зависимости α и A_{eff} для волокна SMF-28.

ствлялся с помощью вариации спектрального контура излучения накачки. Расчеты выполнялись для стандартного волокна SMF-28 длиной 25 км, начальная мощность исходного сигнала на входе в волокно составляла –10 дБм на канал, суммарная мощность накачки была равна 1 Вт. Непрерывный спектр накачки моделировался при помощи 31 монохроматического источника в области 1408 – 1490 нм с частотами генерации, отстоящими друг от друга на 14 см^{-1} . На рис.2 приведены оптимальные контуры рамановского усиления с соответствующими спектрами непрерывной накачки для случаев ненулевого и нулевого среднего усиления. В первом случае неравномерность контура рамановского усиления не превышает 0.1 дБ, для второго случая она составляет 0.042 дБ (суммарные мощности накачки 1 Вт и 0.365 Вт соответственно). Спектральная ширина контура усиления была равна 71 нм в диапазоне 1528 – 1599 нм.

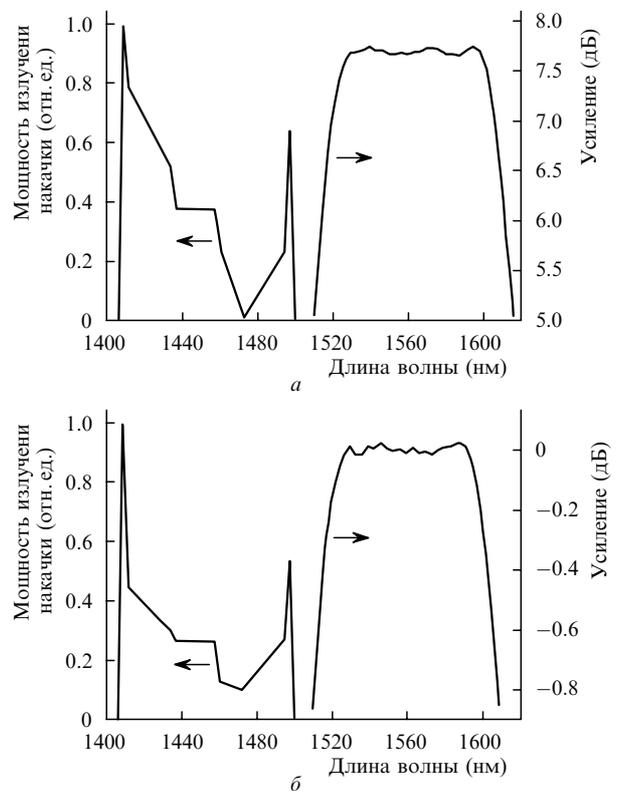


Рис.2. Оптимальные контуры рамановского усиления с соответствующими спектрами непрерывной накачки в случае ненулевого (а) и нулевого среднего (б) усиления.

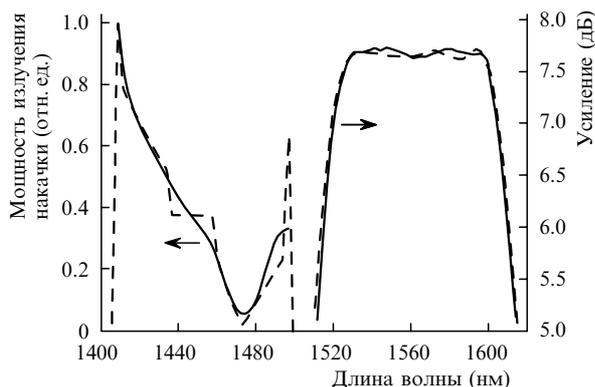


Рис.3. Контур рамановского усиления для дискретного спектра излучения накачки (штриховая линия) и его полиномиальной аппроксимации (сплошная кривая).

Требуемые формы оптимальных непрерывных спектров излучения накачки были получены на первом этапе оптимизации спектра; в дальнейшем контуры этих спектров аппроксимировались полиномом седьмой степени (рис.3), причем более гладкий аппроксимированный спектр накачки обеспечивал ту же (0.1 дБ) неравномерность в той же спектральной области (1528–1599 нм).

Оптимальный непрерывный спектр излучения накачки (рис.3) отличается от спектра, приведенного в [6], существенно более простой формой, что может облегчить его практическую реализацию при помощи относительно небольшого сокращения числа широкополосных источников накачки.

Следует отметить, что рассмотрение набора широкополосных источников накачки, требуемых для создания сплошного результирующего спектра, вполне оправданно с точки зрения экспериментальной реализации такой схемы накачки. Необходимое спектральное уширение линий излучения существующих 14XX-нм источников может быть достигнуто при использовании как специальных волокон [4], так и непосредственно диодных лазеров, в которых отсутствуют спектрально-селективные элементы (узкополосные зеркала, брэгговские решетки и др.). Без использования таких элементов ширины линий излучения 14XX-нм диодных лазеров могут достигать 10–15 нм [10].

В связи с этим было проведено численное исследование схемы накачки рамановского усилителя длиной 25 км, в котором четыре широкополосных источника накачки образуют результирующий спектр, аппроксимирующий найденный оптимальный сплошной спектр накачки. Спектральные формы линий накачек представляли собой гауссовы контуры с ширинами 10 и 15 нм, а центральные длины волн накачек и их мощности оптимизировались с целью получения наименьших отклонений результирующего спектра накачки от оптимального и наименьшей неравномерности контура рамановского усиления.

На рис.4 представлены спектры излучения накачки и соответствующие им спектры рамановского усиления в случае, когда контур накачки рамановского усилителя состоит из четырех гауссово-уширенных контуров общей мощностью 1 Вт. Неравномерность соответствующего контура рамановского усиления не превышает 0.3 дБ в диапазоне длин волн 1526–1578 нм при среднем усилении слабого сигнала 8.7 дБ и спектральной ширине контуров, образующих результирующий спектр накачки,

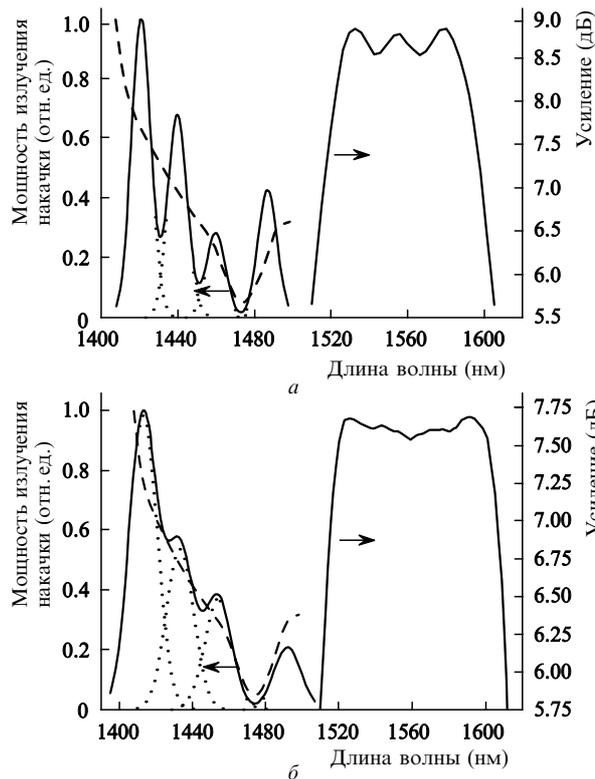


Рис.4. Оптимальные спектры излучения накачки (пунктир), их аппроксимация (штриховые кривые) и соответствующие им контуры рамановского усиления (сплошные кривые) при ширине спектра 10 (а) и 15 нм (б).

10 нм. Центральные длины волн источников накачки составляли 1421, 1440, 1460 и 1487 нм. В случае спектральной ширины гауссово-уширенных контуров 15 нм неравномерность профиля рамановского усиления не превышала 0.15 дБ в диапазоне длин волн 1520–1600 нм при среднем усилении слабого сигнала 7.6 дБ (спектр накачки формировался при помощи источников накачки с центральными длинами волн 1413, 1433, 1454 и 1492 нм).

Важно отметить, что при моделировании непрерывного спектра накачки рамановского усилителя одно из условий оптимизации заключалось в полном использовании мощности спектра накачки для формирования контура рамановского усиления без спектральной фильтрации. Подобное условие явилось следствием необходимости максимальной простоты и эффективности данной схемы. Коротковолновая граница спектра накачки была ограничена пиком поглощения (~ 1400 нм) в стандартном одномодовом волокне, вследствие чего рамановское усиление с длинами волн накачки менее 1400 нм представляется неэффективным. Однако в настоящее время существует возможность расширения спектрального диапазона усиления в коротковолновой области за счет применения оптических волокон с уменьшенными оптическими потерями (например, световоды AllWave фирмы Lucent или TrueWave фирмы Corning).

С точки зрения экспериментальной реализации непрерывного спектра накачки рамановского усилителя данная схема накачки представляется наиболее простой. Ее оптимальным воплощением может являться схема из четырех диодных лазеров (без использования спектрально-селективных элементов) с соответствующими длинами волн излучения генерации либо с предварительным уширением их спектра генерации до 10–15 нм.

3. Заключение

Определены формы сплошных спектров излучения накачки рамановских усилителей, обеспечивающие минимальную неравномерность усиления в широкой спектральной области. Показана возможность получения неравномерности контура усиления менее 0.1 дБ в случае ненулевого среднего значения усиления слабого сигнала и 0.042 дБ – в случае нулевого (суммарные мощности излучения накачки 1 Вт и 0.365 мВт соответственно); при этом спектральная ширина контура усиления составляет 71 нм. Рассмотрены варианты реализации оптимальных сплошных спектров накачки с использованием четырех источников накачки, имеющих спектрально уширенные линии излучения. При ширине линий излучения накачек 15 нм неравномерность профиля рамановского усиления

не превышает 0.15 дБ в диапазоне длин волн 1520–1600 нм при среднем усилении слабого сигнала 7.6 дБ.

1. Dianov E. J. *Light Wave Tech.*, **20**, 1457 (2002).
2. Namiki S., Emory Y. *Sel. Top. Quantum Electron.*, **7**, 3 (2001).
3. Perlin V., Winful H. J. *Light Wave Tech.*, **20**, 250 (2002).
4. Ellingham T., Gleeson L., Doran N. *Tech. Dig. ECOC'2002*, 4.1.3 (2002).
5. Mollenauer L.F., Grant A.R., Mamyshev P.V. *Opt. Lett.*, **27**, 592 (2002).
6. Grant A.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **38**, 1503 (2002).
7. Kobtsev S., Pustovskikh A. *CLEO/Europe-2003, Europhysics Conference Abstracts*, **27E**, CL6-2-FRI (2003).
8. Xiao P., Zeng Q., Huang J., Liu J. *Photon. Tech. Lett.*, **15**, 206 (2003).
9. Ania-Castanon J.D., Kobtsev S.M., Pustovskikh A.A., Turitsyn S.K. *Proc. of LEOS XV Ann. Meet.* (Glasgow, Scotland, 2002, WQ4).
10. Kimura T., Nakae M., Yoshida J., Iizuka S., Sato A., Matsuura H., Shimizu T. *OFC-2002*, 485 (2002).