

Сглаживание контура ВКР-усиления при использовании источников излучения накачки с разными спектральными ширинами линий

С.М.Кобцев, А.А.Пустовских

Впервые численно исследованы волоконные широкополосные ВКР-усилители с обратной накачкой от источников излучения с различными спектральными ширинами линий. Аппроксимация определенного ранее оптимального непрерывного спектра излучения накачки четырьмя излучателями позволила расширить спектральный диапазон 100-километрового ВКР-усилителя до 1522–1596 нм при неравномерности усиления не более 0.2 дБ. Проведено сравнение предложенной схемы накачки со схемами, в которых используются источники излучения с одинаковыми спектральными ширинами линий.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние, волоконный ВКР-усилитель.

1. Введение

Распределенное усиление оптического сигнала за счет вынужденного комбинационного рассеяния представляет значительный интерес для волоконных линий связи с мультиплексированием по длинам волн (технологии WDM и DWDM). ВКР-усилители выгодно отличаются от эрбиевых волоконных и полупроводниковых усилителей возможностью расширения спектральной полосы усиления, низким уровнем шумов и возможностью выравнивания спектрального контура усиления без потерь энергии за счет оптимизации параметров накачки (длина волны, мощность и ширина линии излучения).

Уменьшение неравномерности и расширение спектральной полосы усиления являются наиболее важными задачами при проектировании ВКР-усилителей. Традиционным подходом к решению этих задач, практикуемым в последние годы, стало применение многоволновой накачки с использованием нескольких монохроматических источников излучения, например диодных лазеров, длины волн и мощности излучения которых оптимизировались для достижения наименьшей неравномерности усиления в широкой спектральной полосе. Хотя при увеличении числа разноволновых источников накачки со специально подобранными параметрами улучшается сглаживание результирующего контура ВКР-усиления [1], при этом усложняется система усиления и увеличивается ее стоимость. Предельным случаем многоволновой накачки является схема ВКР-усилителя со сплошным спектром излучения накачки. Такая схема пока не реализована, но теоретически предсказана возможность сглаживания контура ВКР-усиления до остаточной неравномерности на уровне 0.0025 дБ в полосе шириной 65 нм при использовании непрерывного спектра накачки шириной 85 нм [2].

Очевидно, что сплошной спектр излучения накачки можно воспроизвести с помощью большого числа разноволновых монохроматических излучателей. Упрощение этого подхода достигается применением ограниченного числа излучателей со спектрально-уширенными линиями излучения, результирующий спектр которых будет аппроксимировать оптимальный сплошной спектр излучения накачки. Первая демонстрация такого варианта накачки была осуществлена в работе [3], где с помощью четырех излучателей с ширинами линий излучения ~ 8 нм был аппроксимирован оптимальный сплошной спектр излучения накачки и предсказана остаточная неравномерность усиления не более 0.2 дБ в спектральной области 1520–1598 нм. В [3] отмечалось, что ширины линий излучения порядка 8–10 нм могут быть получены непосредственно диодными лазерами, в которых отсутствуют спектрально-селективные элементы (узкополосные зеркала, брэгговские решетки) [4].

В последнее время продемонстрирована возможность спектрального уширения мощного непрерывного излучения в специальных волокнах [5–7]. В настоящее время экспериментально исследуются возможности уширения линий излучения до уровня ~ 20 нм при мощностях 0.5–1 Вт [7]. Возможность регулирования ширины линий излучения накачки позволяет использовать для решения задачи аппроксимации оптимального сплошного спектра накачки источники излучения с различными ширинами спектра.

2. Численный анализ и результаты исследований

При моделировании систем усиления на основе ВКР использовалась наиболее полная численная модель [3], требующая решения двухточечной краевой задачи. Аналитическое решение обратной задачи поиска оптимального спектра излучения накачки для достижения наименьшей неравномерности результирующего контура ВКР-усиления в рамках данной модели невозможно, поэтому оптимальные спектры определялись в ходе решения прямой задачи в совокупности с применением алгоритмов оптимизации результата.

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

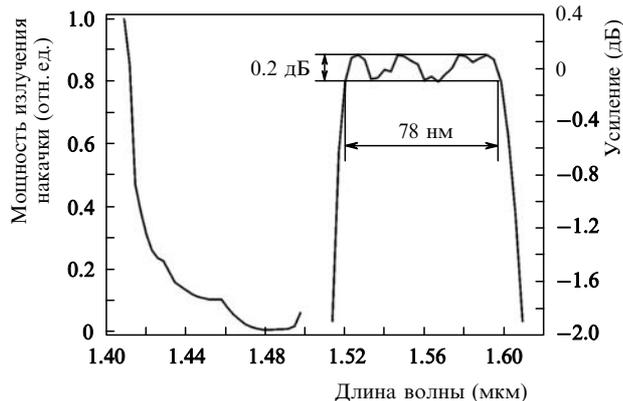


Рис.1. Непрерывный спектр излучения накачки и соответствующий контур ВКР-усиления 100-километрового усилителя с обратной накачкой на основе световода SMF-28 при мощности излучения накачки ~ 1.25 Вт.

Такой метод позволил нам минимизировать неравномерность контура ВКР-усиления [3], которая составила 0.2 дБ в области 1520–1598 нм при накачке непрерывным спектром излучения (рис.1). Исследовалось усиление сигнала мощностью -10 дБм/канал при распространении по стандартному коммуникационному волокну SMF-28. Общая мощность излучения накачки составила 1.25 Вт, что позволило достигнуть полного восстановления уровня сигнала (при нулевом среднем значении усиления) в конце 100-километрового отрезка волоконной линии.

Важно отметить, что численный результат оптимизации контура ВКР-усиления может быть существенно улучшен за счет уменьшения шага шкалы частот, но одновременно значительно усложнится процесс оптимизации и увеличится время вычислений. При этом целью настоящей работы не являлась минимизация неравномерности контура усиления до чрезвычайно низких значений, как это было сделано в работе [2], тем более что экспериментальная реализация ВКР-усилителя со столь малой неравномерностью представляется маловероятной из-за сложности структуры спектра излучения накачки и вероятных нестабильностей ее спектральных компонент. Нами была решена задача поиска непрерывного спектра излучения накачки ВКР-усилителя, обеспечивающего достаточно высокую сглаженность (~ 0.1 дБ) в C + L-диапазонах длин волн, что делает привлекательным его применение для большинства телекоммуникационных приложений. Кроме того, полученный нами спектр излучения накачки имеет значительно более простую форму (по сравнению с [2]), что может существенно упростить экспериментальную реализацию усилителя. Одним из вариантов реализации непрерывного спектра излучения накачки может стать его формирование при помощи относительно небольшого числа спектрально-уширенных источников излучения накачки, суперпозиция которых обеспечивает необходимую неравномерность контура усиления.

Таким образом, задача аппроксимации непрерывного спектра излучения накачки ВКР-усилителя решалась с помощью четырех источников накачки с уширенными спектрами излучения генерации, расположенных в спектральной полосе 1410–1490 нм. Коротковолновая граница диапазона накачки определяется пиком поглощения в области 1.39 мкм, поэтому использование накачки в этой

области снижает эффективность усиления. Длинноволновая граница диапазона накачки находилась из условия ее непересечения с полосой усиления (рис.1). Основными параметрами оптимизации являлись неравномерность контура усиления и ширина диапазона ВКР-усиления.

На рис.2 приведен оптимальный спектр излучения накачки, состоящий из четырех спектрально-уширенных контуров шириной на полувысоте 8 нм. Центральные длины волн излучения источников накачки составили 1420, 1435.5, 1451.3 и 1480 нм. Неравномерность соответствующего контура ВКР-усиления, так же как и в [3], не превышала 0.2 дБ при нулевом среднем значении усиления, но при меньшей ширине спектра, составившей 56 нм (1528–1584 нм) по сравнению с 78 нм при накачке непрерывным спектром излучения. Это можно объяснить малой спектральной мощностью излучения накачки на краях диапазона полосы накачки в случае, когда ее спектр формируется суперпозицией из четырех контуров шириной 8 нм, поскольку нами рассматривался только случай полного использования всей спектральной мощности данных источников излучения накачки без применения частотной фильтрации, которая могла бы нужным образом скорректировать спектр излучения накачки. Последнее ведет к энергетическим потерям, а следовательно, и к уменьшению эффективности всей системы усиления, поэтому такой вариант формирования спектра излучения накачки рассмотрен не был.

Одним из вариантов получения необходимого распределения спектральной плотности мощности излучения накачки может стать применение источников с переменной спектральной шириной – более узких на краях и более широких в середине диапазона излучения накачки. Такая суперпозиция спектров источников может позволить более точно аппроксимировать непрерывный спектр излучения накачки (см. рис.1) для достижения минимально возможной неравномерности и максимальной спектральной ширины результирующего контура ВКР-усиления. Справедливость рассмотрения таких схем накачки может быть обоснована с точки зрения экспериментальной реализации необходимого спектрального уширения возбуждающего излучения накачки.

Исследование схемы накачки ВКР-усилителя с одинаковой шириной спектра излучателей накачки (8–10 нм) актуально с точки зрения применения диодных лазеров без спектрально-селективных элементов, ограничиваю-

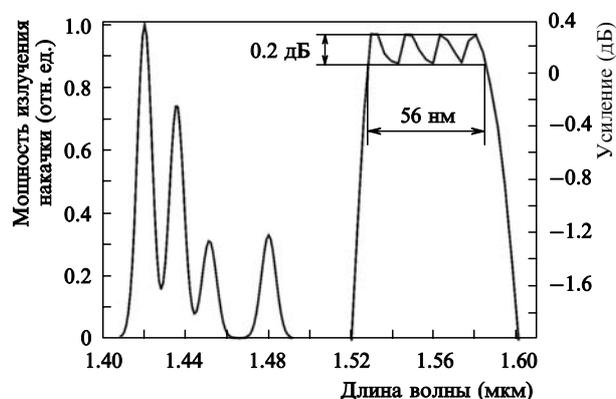


Рис.2. Оптимальный спектр излучения накачки, состоящий из четырех гауссово-уширенных контуров (спектральная ширина каждого контура на полувысоте 8 нм), и соответствующий контур усиления 100-километрового ВКР-усилителя с обратной накачкой на основе световода SMF-28.

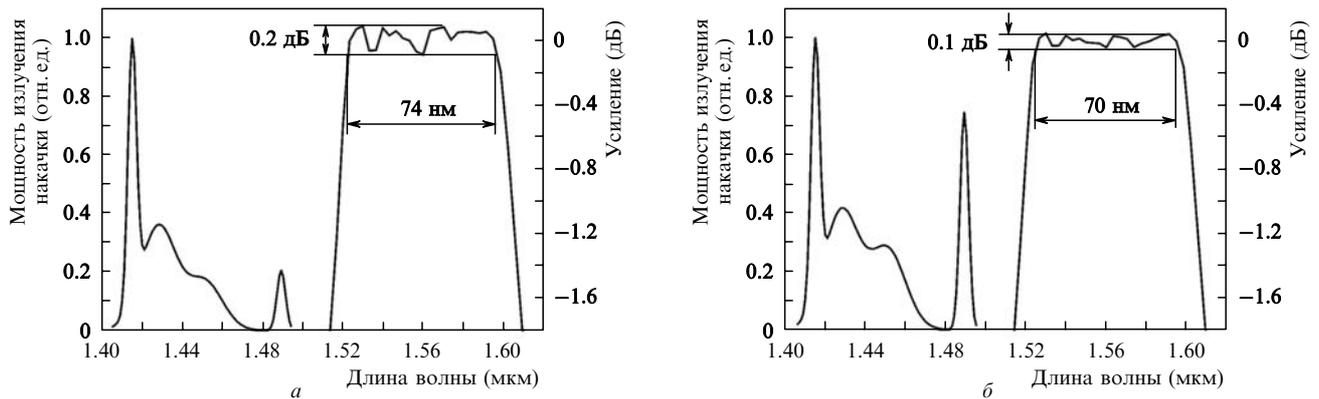


Рис. 3. Оптимальные спектры излучения накачки, состоящие из четырех гауссово-уширенных контуров с переменной спектральной шириной, и соответствующий контур усиления 100- (а) и 50-километрового (б) ВКР-усилителя с обратной накачкой на основе световода SMF-28.

щих ширину линии генерации, которая может достигать в таких случаях требуемых 5–15 нм [4]. В то же время последние исследования показывают, что спектральное уширение непрерывного излучения накачки в оптических волокнах может быть достигнуто благодаря эффекту модуляционной нестабильности [7]; при этом существует возможность управления шириной результирующего спектра за счет длины волокна и мощности излучения накачки. В связи с этим исследование ВКР-усилителей с источниками накачки переменной спектральной ширины перспективно с точки зрения как расчетов по уменьшению неравномерности контура усиления, так и экспериментальной реализации данных схем накачки.

На рис.3,а представлен вариант такой схемы. Центральные длины волн источников накачки составили 1415, 1428, 1451 и 1489 нм, а их спектральные ширины были равны 5, 20, 20 и 5 нм соответственно. Неравномерность соответствующего контура ВКР-усиления опять-таки не превышала 0.2 дБ при нулевом среднем значении усиления, при этом ширина спектра усиления составляла 74 нм (1522–1596 нм). Данный результат демонстрирует, что относительно простое перераспределение спектральной плотности мощности излучения накачки внутри фиксированного диапазона за счет использования переменной ширины спектров позволяет при сохранении неравномерности контура ВКР-усиления на уровне 0.2 дБ увеличить полосу усиления до 74 нм (по сравнению с 56 нм в случае применения источников накачки с одинаковым спектральным уширением 8 нм) и вплотную приблизиться к результату, полученному при использовании непрерывного спектра излучения накачки (78 нм). Это небольшое различие (4 нм) также объясняется краевыми эффектами на границах спектрального диапазона накачки, их влияние на контур ВКР-усиления можно свести к минимуму, производя дальнейшую корректировку спектральных ширин и центральных длин волн источников накачки.

Кроме того, на рис.3,б для сравнения представлен результат моделирования ВКР-усилителя длиной 50 км. В

этом случае данная конфигурация излучения накачки позволяет получить неравномерность контура усиления не более 0.1 дБ в полосе 70 нм (1525–1595 нм).

3. Заключение

Определена форма непрерывного спектра излучения накачки ВКР-усилителя, обеспечивающая минимальную неравномерность усиления в широкой спектральной области. Показана возможность получения неравномерности контура усиления менее 0.2 дБ в случае нулевого среднего значения усиления слабого сигнала (суммарная мощность излучения накачки 1.25 Вт) в 100-километровом усилителе на основе стандартного световода SMF-28 с обратной накачкой, при этом спектральная ширина контура усиления в коммуникационных C + L-диапазонах составляет 78 нм. Численные исследования выполнены с помощью модели, в которой учитываются наиболее важные физические процессы, оказывающие влияние на ВКР-усиление.

Представлены варианты реализации оптимальных непрерывных спектров накачки с использованием четырех спектрально-уширенных источников излучения накачки. При спектральной ширине линий излучения источников 8 нм неравномерность контура усиления не превышает 0.2 дБ в диапазоне длин волн 1528–1584 нм, а при ширине спектра источников 5 и 20 нм полоса диапазона усиления может увеличиться до 74 нм (1522–1596 нм) при сохранении неравномерности ВКР-усиления на уровне 0.2 дБ.

1. Namiki S., Emory Y. *Sel. Top. Quantum Electron.*, 7, 3 (2001).
2. Grant A.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, 38, 1503 (2002).
3. Кобцев С.М., Пустовских А.А. *Квантовая электроника*, 34, 575 (2004).
4. Kimura T. et al. *OFC-2002*, 485 (2002).
5. Ellingham T. J., Gleeson L., Doran N. *ECOC-2002*, 4.1.3 (2002).
6. Chestnut D., Taylor J. *Opt. Lett.*, 28, 2294 (2003).
7. Ellingham T.J. et al. *Nonlinear Guided Waves and Their Applications*, MC42 (2004).