

На правах рукописи

Пустовских Алексей Анатольевич

**Исследование широкополосных
оптоволоконных ВКР-усилителей
с полихроматичной накачкой**

01.04.05 "Оптика"

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Новосибирск - 2005



Работа выполнена в Новосибирском государственном университете

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Кобцев Сергей Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Бабин Сергей Алексеевич

доктор физико-математических наук
Курков Андрей Семенович

Ведущая организация: Институт вычислительных технологий
СО РАН

Защита состоится "09" декабря 2005 г. в 10 часов на
заседании диссертационного совета К 003.005.01 в Институте
автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Новосибирск,
просп. Акад. Колтуга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
автоматики и электрометрии СО РАН.

Автореферат разослан "09" ноября 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н.

 В.П.Косых

2006-4
27827

2252368

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Бурное развитие телекоммуникационных систем и технологий в последние несколько десятилетий обусловило растущий интерес к оптоволоконным линиям связи. Основными направлениями развития оптоволоконных систем передачи данных является увеличение пропускной способности и длины участка линии связи, на котором оптический сигнал может распространяться без использования устройств регенерации оптического сигнала. Применение оптических усилителей позволяет улучшить оба этих параметра, однако исследование методов оптимального увеличения этих параметров с учетом особенностей оптических усилителей является отдельной задачей.

Затухание мощности оптического сигнала при распространении по оптическому волокну происходит за счет оптических потерь, уровень которых хоть и сведен к минимуму в достаточно широкой спектральной области (1420-1620 нм), но все же имеет конечное значение (~ 0.2 дБ/км), что не позволяет передавать сигнал на значительные расстояния ($\sim 10-100$ км) без восстановления энергии сигнала. Для усиления оптического сигнала могут применяться различные типы усилителей, к числу основных можно отнести полупроводниковые [1], эрбиевые [2] и усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР-усилители, или рамановские усилители по западной терминологии) [3, 4]. Полупроводниковые усилители использовались на ранних этапах развития систем усиления оптического сигнала в волоконных линиях связи, в настоящее время их использование сведено к минимуму в связи с низкой эффективностью ввода и вывода излучения, высоким уровнем шумов и относительной дороговизной. В дальнейшем наибольшее распространение в оптоволоконных линиях связи получили эрбиевые и ВКР-усилители.

Основными недостатками эрбиевых усилителей оптического сигнала, принцип действия которых основан на использовании ионов эрбия в качестве допирующего элемента кварцевых волоконных световодов, являются ограниченность спектральной ширины полосы усиления (порядка 40 нм) и относительно высокая неравномерность усиления внутри этой полосы, которая превышает 1 дБ без использования систем спектральной фильтрации. Эти параметры обусловлены свойствами усиливающей среды.

В протяженных волоконных линиях оптической связи одним из важнейших параметров усилителей сигнала является длина отрезка линии связи, внутри которого оптический сигнал может распространяться без



дополнительного восстановления уровня энергии сигнала. Основным ограничивающим фактором при увеличении длины отрезка усиления является уровень мощности сигнала, который при больших дистанциях распространения за счет оптических потерь может снизиться до уровня шумовых компонент, вследствие чего передаваемая информация может быть частично или полностью утеряна. Увеличить расстояние передачи оптического сигнала можно за счет увеличения начального уровня энергии сигнала, однако в этом случае могут возникнуть потери передаваемой информации из-за нелинейного взаимодействия различных спектральных компонент сигнала при достижении определенного уровня энергии сигнала. Таким образом, при точечном усилении (полупроводниковые, эрбиевые усилители) максимальная длина распространения оптического сигнала между точками усиления ограничена из-за затухания энергии сигнала за счет оптических потерь. Для усилителей точечного типа в большинстве случаев это расстояние составляет порядка 25 км.

В связи с этим, для протяженных линий связи значительный интерес представляют распределенные усилители сигнала. Такой тип усилителей позволяет относительно равномерно поддерживать интенсивность распространяющегося сигнала на начальном уровне, что в значительной степени ослабляет влияние нелинейных и шумовых эффектов на распространение оптического сигнала, а длина участка оптической связи между точками усиления возрастает до 100 км и более [3, 4]. На сегодняшний день распределенное усиление может быть достигнуто только за счет использования эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (в зарубежной литературе также известного как Рамановское рассеяние) в кварцевых волоконных световодах. Основными преимуществами ВКР-усилителей оптического сигнала являются:

- принципиальная возможность усиления на любой длине волны, реализация этой возможности определяется только наличием источников излучения накачки в заданном спектральном диапазоне;
- возможность широкополосного (в спектральном диапазоне более 100 нм) усиления за счет комбинирования нескольких источников излучения накачки;
- усиливающей средой является непосредственно волоконный световод, при встречной накачке усиление оптического сигнала распределяется по всей длине волокна;
- низкий уровень шумов и высокая температурная стабильность коэффициента усиления.

В связи с вышперечисленным можно сказать, что ВКР-усилители оптического сигнала в перспективе являются универсальным инструментом для распределенного широкополосного усиления оптического сигнала в протяженных волоконных линиях связи. Возможность формирования требуемой формы контура усиления за счет комбинирования нескольких источников накачки с определенными значениями длины волны и мощности излучения позволяет использовать данный тип усилителей в системах передачи данных с высокой спектральной плотностью каналов, где требования к остаточной неравномерности контура усиления достаточно высоки.

Традиционно для эффективного широкополосного ВКР-усиления с высокой равномерностью контура усиления применяется накачка несколькими монохроматическими источниками излучения, в качестве которых в большинстве случаев используются диодные лазеры. Увеличение числа источников накачки в заданном спектральном диапазоне при определенном соотношении их мощностей излучения ведет к сглаживанию результирующего спектра ВКР-усиления [5]. Предельным случаем многоволновой накачки является непрерывный спектр излучения накачки [6, 7]. Однако открытым остается вопрос доступности источников накачки, способных формировать данный спектр. Одним из возможных решений данной проблемы является применение суперпозиции нескольких источников излучения накачки с относительно широкими спектрами излучения, в качестве которых могут быть использованы как непосредственно диодные лазеры без использования систем спектральной фильтрации выходного излучения, так и узкополосные источники, спектр излучения которых может быть предварительно уширен в волокнах специального типа [8]. Эти вопросы требовали детального исследования и постановки целенаправленных экспериментов.

Цель работы, исходя из вышесказанного, состояла в исследовании спектральных схем встречной накачки ВКР-усилителей, поиске оптимальных схем полихроматичной накачки для достижения минимальной неравномерности результирующего контура ВКР-усиления в спектральном диапазоне, традиционно используемом для передачи оптического сигнала (преимущественно 1520-1600 нм). Полученные знания о принципах формирования контура ВКР-усиления планировалось применить для практической реализации данного типа усилителей. Решение поставленной задачи включало следующие этапы:

1. Исследование систем ВКР-усиления с использованием относительно небольшого числа узкополосных источников излучения накачки.

Поиск параметра оптимизации, решение частной задачи оптимизации в случае трех узкополосных источников излучения накачки.

2. Поиск оптимального непрерывного спектра полихроматичной накачки ВКР-усилителя, как предельного случая многоволновой накачки. Оптимизация спектра результирующего контура усиления в расширенном коммуникационном диапазоне.
3. Аппроксимация непрерывного спектра полихроматичной накачки набором широкополосных источников излучения накачки, как вариант экспериментальной реализации такой схемы накачки. Исследование стабильности предложенной схемы. Поиск источников широкополосного излучения. Уширение спектра непрерывного излучения накачки за счет эффекта модуляционной неустойчивости в волокнах специального типа.

Новизна работы: Полученные в диссертации численные и экспериментальные результаты позволили выявить достаточно полную картину влияния спектральных схем полихроматичной накачки на результирующий контур ВКР-усиления. Впервые предложена и исследована схема накачки с использованием суперпозиции широкополосных источников излучения для аппроксимации непрерывного спектра полихроматичной накачки ВКР-усилителей. Экспериментально реализован частный случай такой схемы накачки с предварительным спектральным уширением излучения накачки в волокнах специального типа.

Практическая значимость: Практическая ценность полученных результатов определяется в первую очередь тем, что в диссертации разработаны новые методы оптимизации спектральных схем полихроматичной накачки волоконных ВКР-усилителей оптического сигнала. На основе этих методов оптимизации были предложены и исследованы качественно новые схемы накачки, такие как непрерывный спектр излучения накачки и суперпозиция спектрально уширенных источников излучения накачки. В частности, результаты работы можно использовать для проектирования систем усиления в протяженных волоконных линиях оптической связи с различными требованиями к контуру результирующего усиления, так же как и к количеству и спектральным характеристикам источников излучения накачки.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный метод оптимизации трехволновой схемы встречной накачки оптоволоконного ВКР-усилителя позволяет минимизировать неравномерность усиления в заданной спектральной области. Достижение наименьшей неравномерности усиления осуществляется как вариацией спектрального положения линий излучения накачки, так и изменением соотношения мощностей излучения накачки на разных линиях. Выбор схемы накачки позволяет варьировать ширину полосы усиления и среднее значение усиления.
2. Предложенный метод оптимизации формы непрерывного спектра встречной накачки оптоволоконного ВКР-усилителя позволяет минимизировать неравномерность усиления в расширенном спектральном диапазоне.
3. Непрерывный спектр излучения накачки оптоволоконного ВКР-усилителя аппроксимируется с помощью четырех источников излучения с ширинами линий 5-20 нм. Найденные оптимальные схемы четырехволновой встречной накачки обеспечивают наилучшую равномерность усиления в широкой спектральной области.
4. Разработанный и созданный оптоволоконный ВКР-усилитель с двухволновой встречной накачкой со спектрально уширенными линиями излучения обеспечивает двукратное уменьшение неравномерности усиления в заданном спектральном диапазоне по сравнению с аналогичной схемой накачки, использующей более узкие линии излучения.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на 7 конференциях: Международная конференция по квантовой электронике - Конференция по лазерам, применениям и технологиям IQEC/LAT (Москва, 2002), 15-е ежегодное собрание оптического общества по лазерам и электрооптике LEOS (Глазго, Шотландия, 2002), Европейская конференция по лазерам и электрооптике CLEO/Europe (Мюнхен, Германия, 2003), 5-я тихоокеанская конференция по лазерам и электрооптике CLEO/Pacific Rim (Тайвань, 2003), 30-я европейская конференция по оптическим коммуникациям ECOC (Стокгольм, Швеция, 2004), Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике - Конференция по лазерам, применениям и технологиям ICONO/LAT (С.-

Петербург, 2005), Европейская конференция по лазерам и электрооптике CLEO/Europe (Мюнхен, Германия, 2005). Результаты также докладывались на семинаре Института автоматизации и электрометрии СО РАН.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, в котором сформулированы защищаемые положения, трех глав с изложением материала диссертации и заключения, в котором перечислены основные результаты. Общий объем диссертации составляет 103 страницы, включая 27 рисунков и список литературы из 84 наименований.

Содержание работы

Во Введении описано современное состояние дел в волоконной оптике, дан анализ уровня развития волоконных систем усиления оптического сигнала на момент начала работ. Далее обсуждается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и этапы диссертационной работы, кратко описаны методы численного моделирования и постановка основных экспериментов. В конце приведено краткое содержание диссертации и сформулированы защищаемые положения.

Материал разбит на три главы, первая из которых является методической, а остальные главы посвящены изложению материала исследований в соответствии с этапами работы.

В первой главе дано описание основ и принципов эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в оптических волоконных световодах. В §1 обсуждается эффект ВКР в оптических волокнах, дано описание спонтанного и вынужденного рассеяния света, в том числе и описание модели вынужденного комбинационного рассеяния на примере классического затухающего осциллятора. В §2 обсуждается применение ВКР для усиления оптического сигнала, приведен обзор литературы, посвященной ВКР-усилению, численных методов оптимизации и наиболее ярких экспериментальных результатов, полученных к настоящему моменту.

Во второй главе дано описание численных исследований схем накачки ВКР-усилителей. В §3 обсуждается численная модель ВКР-усиления, используемая в расчетах. По сути, она представляет собой систему балансных уравнений для средних мощностей источников накачки и сигнальных каналов. Вместе с граничными условиями на обоих концах световода система дифференциальных уравнений образует

двухточечную краевую задачу, для решения которой требуется применение численных методов [9, 10]. В данной работе для решения двухточечной краевой задачи применялись вычислительные средства системы MatLab 6.1, где решение двухточечной краевой задачи реализовано на основе метода коллокаций. Исследуется справедливость применения данного метода, проводится его сравнение с традиционными методами решения дифференциальных уравнений (метод "стрельбы" и др.), а также с экспериментальными результатами других авторов.

В §4 рассмотрена трехволновая схема накачки ВКР-усилителей. Исследована схема накачки, состоящая из трех узкополосных источников излучения накачки в спектральном диапазоне 1420-1480 нм общей мощностью 1 Вт. Были предложены две схемы накачки: с равномерным расположением длин волн источников внутри диапазона накачки (1420, 1450 и 1480 нм) и оптимизации их мощностей $P_{1,2,3}$ для сглаживания неравномерности соответствующего контура ВКР-усиления; с равномерным распределением общей мощности излучения между источниками накачки ($P_{1,2,3} = 1/3$ Вт) и оптимизацией длин волн источников $\lambda_{1,2,3}$ внутри спектрального диапазона накачки. Для каждой из этих схем выбран безразмерный параметр оптимизации, $k_1 = (P_3 - P_1)/(P_3 + P_1)$, где P_1, P_2, P_3 - мощности излучения накачки на длинах волн λ_1, λ_2 и λ_3 , соответственно, и $k_2 = (\lambda_2 - \lambda_1)/(\lambda_3 - \lambda_1)$, где $\lambda_{1,2,3}$ - соответствующие частоты компонент излучения накачки ($\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$).

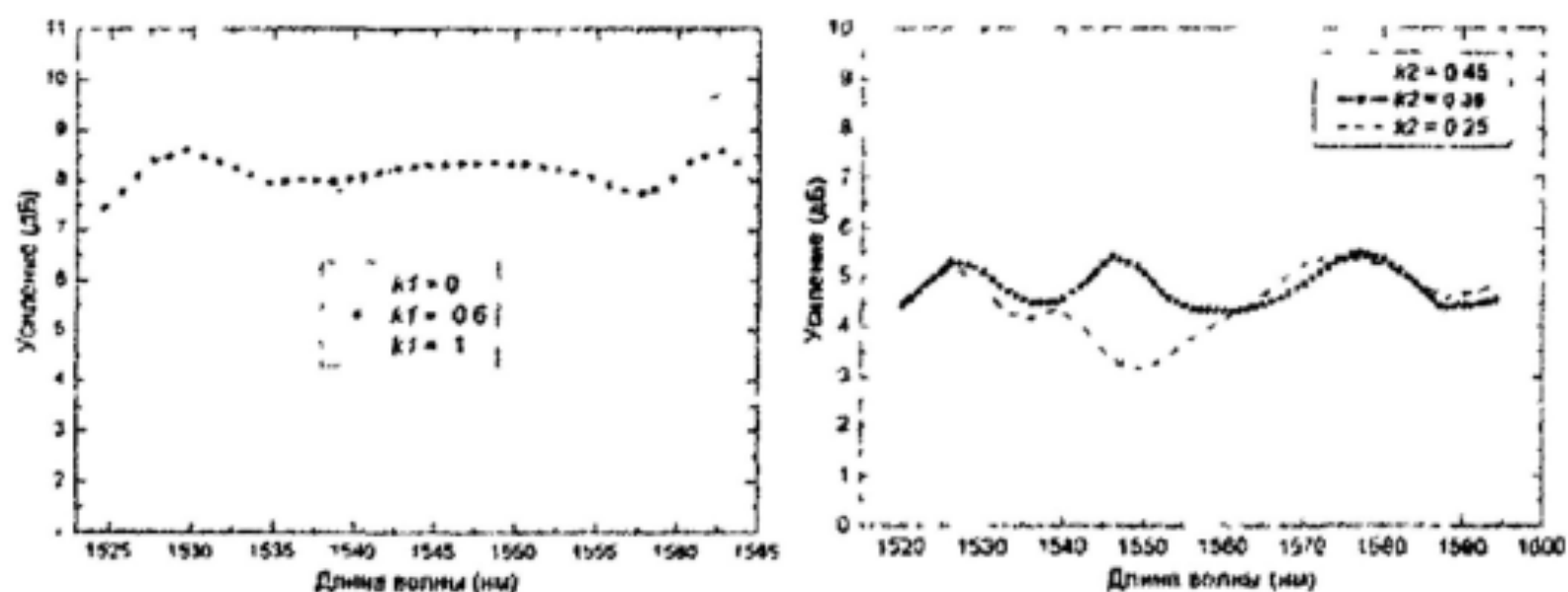


Рисунок 1: Спектры ВКР-усиления с минимальной неравномерностью (сплошная линия), соответствующие оптимальным значениям параметров оптимизации k_1 и k_2 , пунктиром приведены спектры ВКР-усиления для неоптимальных значений этих параметров.

Поиск минимальных значений этих параметров позволил определить экстремум зависимости неравномерности контура ВКР-усиления ΔG от k_1

и k_2 , а, следовательно, и определить оптимальные значения $\lambda_{1,2,3}$ и $P_{1,2,3}$, дающие описание схемы излучения накачки в каждом конкретном случае. В результате было получено, что при использовании обеих схем накачки неравномерность контура усиления в 25-километровом ВКР-усилителе не превышает 1.2 дБ, однако в первом случае спектральная полоса усиления составляет 1525-1565 нм (40 каналов сигнала) при среднем значении усиления 8.1 дБ, а во втором случае - 1520-1595 нм (75 каналов) при среднем значении усиления 4.9 дБ (рис. 1).

В §5 приведено описание исследований ВКР-усилителей с непрерывным спектром излучения накачки. Предложен метод оптимизации непрерывного спектра излучения накачки в диапазоне 1408-1498 нм общей мощностью 1 Вт для 25-километрового ВКР-усилителя, состоящий в последовательном разбиении спектрального диапазона излучения накачки на интервалы с последующей корректировкой параметров накачки внутри каждого интервала. Показано, что уже на первом шаге оптимизации спектра накачки (применение спектра накачки треугольной формы) может быть достигнуто значительное сглаживание ВКР-усиления (с 7.5 до 1 дБ) в диапазоне 1520-1600 нм. Дальнейшее разбиение спектра накачки на интервалы и вариация параметров накачки внутри этих интервалов позволило получить ВКР-усиление в спектральном диапазоне 1528-1599 нм, неравномерность которого не превышала 0.1 дБ при среднем значении усиления 7.7 дБ, и 0.042 дБ при нулевом среднем значении усиления (рис. 2). Исследована возможность гладкой аппроксимации (полиномом 7-й степени) найденного спектра накачки для удобства поиска вариантов его экспериментальной реализации.

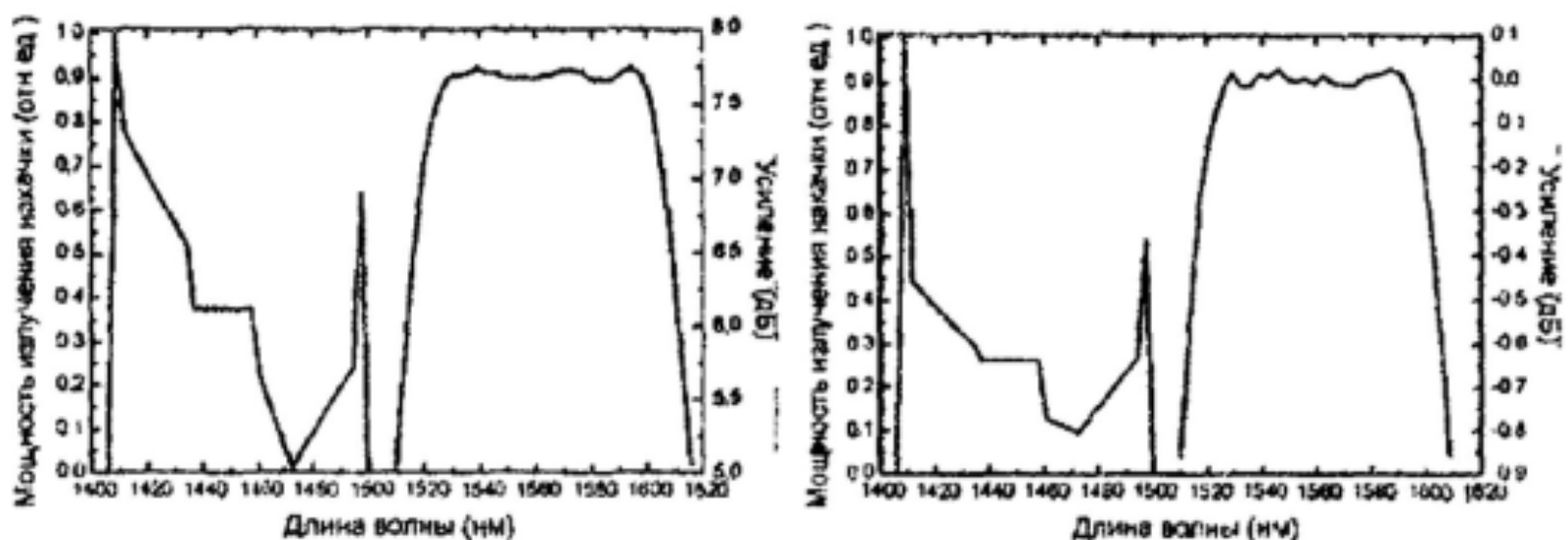


Рисунок 2: Оптимальные контуры ВКР-усиления с соответствующими спектрами непрерывной накачки в случае ненулевого и нулевого среднего значения усиления слабого сигнала.

В §6 предложены и исследованы варианты реализации найденного непрерывного спектра излучения накачки. Показано, что суперпозиция относительно небольшого числа спектрально уширенных источников излучения накачки позволяет достаточно эффективно аппроксимировать непрерывный спектр накачки и получить относительно высокую равномерность контура ВКР-усиления в такой схеме накачки. Так, при ширине спектров излучения источников накачки ~ 10 нм (в качестве которых могут быть использованы диодные лазеры без использования ограничивающих ширину линии генерации спектрально-селективных элементов, которая может достигать в таких случаях требуемых 5-15 нм), в 100-километровом ВКР-усилителе достигнута неравномерность контура усиления 0.2 дБ в полосе 1528-1584 нм. При непрерывном спектре накачки в аналогичном усилителе полоса усиления с такой же неравномерностью составляет 1520-1598 нм. Уменьшение полосы усиления очевидно связано с различиями в распределении мощности излучения на краях спектрального диапазона накачки, в связи с чем предложена схема накачки широкополосными источниками с различными ширинами спектров излучения - более узкими на краях и более широкими в центральной части диапазона накачки. Показано, что применение такой схемы позволяет увеличить полосу усиления до 74 нм. Также обсуждается справедливость рассмотрения таких схем накачки с точки зрения экспериментальной реализации, этот вопрос потребовал дополнительного исследования, проведенного в Главе 3.

В §7 подведен итог численных исследований, перечислены основные результаты и проведено сравнение разработанных схем накачки ВКР-усилителей.

В третьей главе представлены результаты численного и экспериментального исследования ВКР-усилителя с накачкой широкополосными источниками излучения на длинах волн 1455 и 1480 нм. В §8 кратко изложены предпосылки для создания ВКР-усилителей такого типа.

В §9 приведено описание эффекта модуляционной неустойчивости в оптических волокнах. Этот эффект наблюдается как распад непрерывной или квазинепрерывной периодической волны на последовательность сверхкоротких импульсов. Выражение для коэффициента усиления модуляционной неустойчивости можно получить при рассмотрении вопроса устойчивости стационарного решения уравнения распространения электромагнитных волн в оптических волокнах [11]:

$$g(\Omega) = |\beta_2 \Omega| (\Omega_c^2 - \Omega^2)^{1/2}, \quad (1)$$

где:

$$\Omega_c^2 = \frac{4\gamma P_0}{|\beta_2|} = \frac{4}{|\beta_2| L_{NL}}, \quad (2)$$

где β_2 - дисперсионный параметр, а L_{NL} - нелинейная длина. В результате, в спектре распространяющегося излучения появляются дополнительные спектральные компоненты, соответствующие дисперсионному соотношению (1), максимумы которых расположены симметрично по обе стороны от центральной частоты ω_0 со спектральной отстройкой $\pm\Omega_{\max}$, где Ω_{\max} определяется следующей формулой:

$$\Omega_{\max} = \pm \frac{\Omega_c}{\sqrt{2}} = \pm \left(\frac{2\gamma P_0}{|\beta_2|} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Во временном представлении стационарная гармоническая волна преобразуется в периодическую последовательность импульсов с периодом $T_m = 2\pi/\Omega_{\max}$. Последующее совместное влияние нелинейных эффектов, таких как модуляционная неустойчивость, фазовая самомодуляция, четырехволновое смешение и вынужденное комбинационное рассеяние может привести к значительному уширению спектра промодулированного излучения. Приведены предварительные численные исследования, подтверждающие эту гипотезу.

В §10 дано описание постановки и результатов экспериментов по усилению оптического сигнала в ВКР-усилителе с накачкой двумя источниками на длинах волн 1455 и 1480 нм с предварительным уширением спектра непрерывного излучения накачки в волокнах специального типа за счет явления модуляционной неустойчивости. Представлены результаты численных экспериментов ВКР-усиления в данной схеме накачки, определены оптимальные мощности каждого из источников накачки. Исследована эволюция спектра накачки в зависимости от мощности излучения на входе в световод, используемый для уширения спектра излучения накачки, в результате определены начальные мощности источников накачки, необходимые для реализации спектрального уширения, максимально приближенного к расчетным значениям. Это позволило реализовать ВКР-усиление в 25-километровом одномодовом волоконном световоде с относительно плоским контуром усиления, неравномерность которого не превышала 0.13 дБ в диапазоне 1567-1587 нм, при этом по сравнению со случаем монохроматических источников излучения накачки неравномерность контура усиления в этом диапазоне уменьшена в два раза (рис. 3).

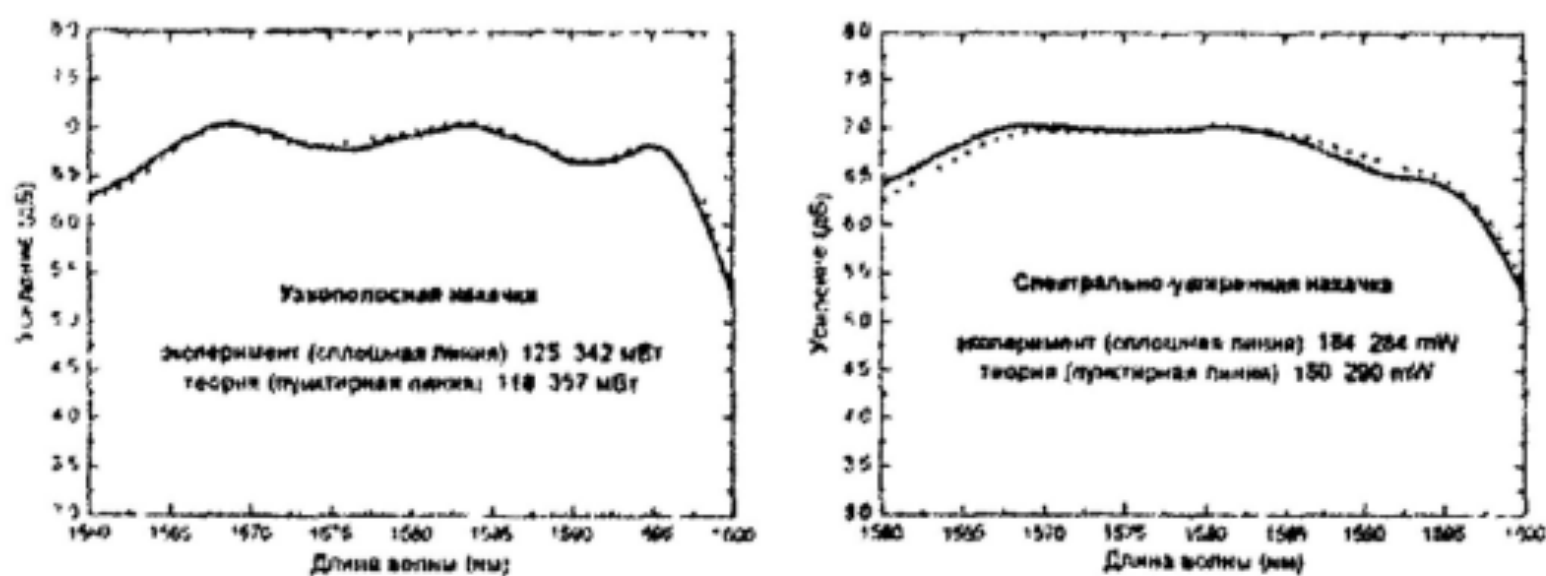


Рисунок 3: Экспериментальные (сплошная линия) и численные (пунктир) результаты ВКР-усиления слабого сигнала (0.1 мВт/канал) в волоконной линии связи длиной 25 км при использовании двух монохроматических (левый рисунок) и спектрально уширенных (правый рисунок) источников излучения накачки на длинах волн 1455 и 1480 нм.

С учетом оптимизации параметров накачки было проведено повторное численное моделирование ВКР-усилителя, в результате получены очень близкие значения численных и экспериментальных результатов, что позволило положительно оценить применимость численной модели ВКР-усиления и математического аппарата, используемого для моделирования ВКР-усиления в данной работе. В §11 приведено краткое обсуждение результатов, изложенных в данной главе.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертации и кратко обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

Основные результаты

1. Разработан алгоритм выбора параметров трехволновой схемы встречной накачки ВКР-усилителей узкополосными источниками излучения для достижения наилучшей равномерности контура усиления. Показано, что в 25-км ВКР-усилителе с трехволновой накачкой в диапазоне 1420-1480 нм может быть получена неравномерность усиления не более 1.2 дБ в полосе 1525-1565/1520-1595 нм, при этом ширина полосы усиления и среднее значение усиления внутри этой полосы зависят от выбора схемы накачки.

2. Предложен эффективный метод оптимизации ВКР-усилителя с непрерывным спектром излучения встречной накачки в спектральной полосе 1408-1498 нм, позволивший минимизировать неравномерность контура усиления в диапазоне 1528-1599 нм до 0.1 дБ в 25-км волоконном ВКР-усилителе.
3. Предложены варианты реализации найденного непрерывного спектра излучения накачки. Показано, что суперпозиция четырех широкополосных источников излучения накачки в спектральной полосе 1408-1498 нм позволяет аппроксимировать непрерывный спектр излучения накачки с относительно небольшим (менее 5 нм) уменьшением спектральной ширины полосы ВКР-усиления при сохранении неравномерности контура усиления на уровне 0.2 дБ.
4. Проведено численное и экспериментальное исследование волоконного ВКР-усилителя со встречной накачкой двумя источниками излучения со спектрально уширенными линиями излучения за счет их предварительного уширения в волокнах специального типа. Исследована зависимость ширины линии излучения накачки от начальной мощности излучения. За счет уширения спектров накачки достигнуто двукратное уменьшение неравномерности контура усиления 25-километрового ВКР-усилителя в диапазоне 1567-1587 нм по сравнению с узкополосной накачкой, которая составила 0.13 дБ. Получено хорошее совпадение экспериментальных результатов с результатами численного моделирования, позволяющее положительно оценить применимость методов численного моделирования, использованных в работе.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. С.М. Кобцев, А.А. Пустовских. Волоконный рамановский усилитель с непрерывным спектром излучения накачки. *Квантовая электроника*, 2004, т. 34, N 6, с. 575-578.
2. С.М. Кобцев, А.А. Пустовских. Сглаживание контура ВКР-усиления при использовании источников излучения накачки с разными спектральными ширинами линий. *Квантовая электроника*, 2004, т. 34, N 11, с. 1054-1056.

3. S.M. Kobtsev, A.A. Pustovskikh. Improvement of Raman amplifier gain flatness by broadband pumping sources. *Laser Physics*, 2004, v. 14, N 12, pp. 1488-1492.
4. T.J. Ellingham, J.D. Ania-Castanon, S.K. Turitsyn, A.A. Pustovskikh, S.M. Kobtsev, M.P. Fedoruk. Dual-pump Raman amplification with increased flatness using modulation instability. *Optics Express*, 2005, vol. 13, N 4, pp. 1079-1084.
5. S.M. Kobtsev, S.V. Kukarin, A.A. Pustovskikh, N.V. Fateev. Stimulated Raman scattering in lengthy AllWave fiber with Nd:YAG laser pumping. *IQEC/LAT-2002 Conference, June 2002, Moscow. IQEC 2002 Tech. Digest*, p. 317, QTuO13.
6. J.D. Ania-Castanon, S.M. Kobtsev, A.A. Pustovskikh, S.K. Turitsyn. Simple design method for gain-flattened three-pump Raman amplifiers. *Lasers and Electro-Optics Society, 2002, Glasgow, Scotland. LEOS 2002, Tech. Prog., WQ4. The 15th Annual Meeting of the IEEE, v. 2, 10-14 Nov. 2002, v. 2, pp. 500-501.*
7. S.M. Kobtsev, A.A. Pustovskikh. Low gain ripple broadband Raman amplifier with continuous-spectrum pump. *CLEO/Europe-2003, Munich, Germany, CL6-2-FRI. Lasers and Electro-Optics Europe, 2003, 22-27 June 2003, Proc. Conf., p. 630.*
8. S.M. Kobtsev, A.A. Pustovskikh. Gain-flattened Raman amplifier with broad-linewidth pumps approximating continuous-spectrum pump. *The 5th Pacific Rim Conference "Lasers and Electro-Optics, 2003". CLEO/Pacific Rim 2003, Taipei, Taiwan, 15-19 Dec. 2003, THP-(8)-12. Proc. Conf., v. 2, p. 570.*
9. T.J. Ellingham, A.A. Pustovskikh, J.D. Ania-Castanon, M.P. Fedoruk, S.M. Kobtsev, S.K. Turitsyn. Raman amplifier with increased flatness using modulation instability. *30th European Conference on Optical Communication, September 5-9, 2004, Stockholm, Sweden. ECOC-2004 Prog., We1.3.4., p. 40.*
10. S.M. Kobtsev, A.A. Pustovskikh, S.V. Smirnov. Wide-spectrum supercontinuum generation in fibers with CW pump. *ICONO/LAT-2005, May 11-15, 2005, St. Petersburg, Russia. ICONO/LAT-2005 Tech. Digest, IThS43.*
11. T.J. Ellingham, J.D. Ania-Castanon, A.A. Pustovskikh, M.P. Fedoruk, S.M. Kobtsev, S.K. Turitsyn. Dual-pump Raman amplification with enhanced flatness using modulation instability. *CLEO/Europe-2005, Munich, Germany, CD7-4-TUE. Lasers and Electro-Optics Europe, 2005, 12-17 June 2005.*

Список цитированной литературы

- [1] M.J. Connelly. Semiconductor optical amplifiers. *Springer (1st edition), 2002.*
- [2] E. Desurvire. Erbium-doped fiber amplifiers. *Wiley Inter-Science Publications, New York, 1994.*
- [3] E. Dianov. Advances in Raman fibers. *J. Lightwave Technology, 2002, Vol. 20, N7, pp.1457-1462.*
- [4] M. Islam. Raman amplifiers for telecommunications. *J. of Selected Topics in Quantum Electronics, 2002, Vol.8, N3, pp. 548-559.*
- [5] S. Namiki, Y. Emory. Ultrabroad-band Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes. *J. of Selected Topics in Quantum Electronics, 2001, Vol.7, N1, pp. 3-16.*
- [6] A. Grant. Calculating the Raman pump distribution to achieve minimum gain ripple. *J. of Quantum Electronics, 2002, Vol.38, N11, pp 1503-1509.*
- [7] L.F. Mollenauer, A.R. Grant, P. V. Mamyshev. Time-division multiplexing of pump wavelengths to achieve ultrabroadband, flat, backward-pumped Raman gain. *Optics Letters, 2002, Vol.27, N8, pp. 592-594.*
- [8] D.A. Chestnut, J.R. Taylor. Gain-flattened fiber Raman amplifiers with nonlinearity-broadened pumps. *Optics Letters, 2003, Vol.28, N23, pp. 2294-2296.*
- [9] U. Ascher, J. Christiansen, R.D. Russel. Collocation software for boundary-value ODEs. *ACM Transactions on Mathematical Software, 1981, Vol.7, N2, pp. 209-222.*
- [10] X. Liu. Powerful solution for simulating nonlinear coupled equations describing bidirectionally pumped broadband Raman amplifiers. *Optics Express, 2004, Vol.12, N4, pp. 545-550.*
- [11] G.P. Agrawal. Nonlinear fiber optics. *2nd ed. San Diego, CA: Academic, 1995.*

h
l

i
k
l

