

На правах рукописи

Ватник Илья Дмитриевич

**Мощностные характеристики волоконного
ВКР-лазера со случайной распределенной обратной
связью**

01.04.05 “Оптика”

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Институте автоматики и электрометрии
Сибирского отделения
Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН)

Научный руководитель: **Чуркин Дмитрий Владимирович**
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник, Институт
автоматики и электрометрии

Официальные оппоненты: **Курков Андрей Семенович**
доктор физико-математических наук,
профессор, ведущий научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва

Смирнов Сергей Валерьевич
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник, Новосибирский
государственный университет, г. Новосибирск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Научный центр волоконной оптики
РАН, г. Москва

Защита состоится «10» апреля 2015 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 003.005.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН и на сайте www.iae.nsk.su.

Автореферат разослан « 30 » января 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.

Ильичёв Л.В.

Общая характеристика работы

Актуальность

В 2010 году была продемонстрирована работа нового типа волоконного лазера — ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью [1]. В нем обратная связь реализуется за счет обратного рэлеевского рассеяния на неоднородностях, случайным образом расположенных всюду вдоль сердцевины волоконного световода. Усиление в лазере создается за счет нелинейного эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [2].

ВКР-лазер со случайной распределенной обратной связью обладает всеми преимуществами волоконных лазеров, использующих эффект ВКР для создания усиления, отличаясь при этом простотой и отсутствием модового состава в излучении. Лазер может быть использован для разнообразных применений: получения многоволновой [3] и перестраиваемой [4] генерации, создания распределенного усиления в оптических линиях связи [5] и сенсорных системах [6], получения генерации в новых спектральных диапазонах. Однако, несмотря на непрерывно растущий интерес к лазеру со случайной распределенной обратной связью, практически не уделялось внимания таким базисным свойствам лазера, как мощностные характеристики. В работах [1, 7] было описано поведение пороговых мощностей генерации накачки в зависимости от длины лазера, однако полноценного исследования зависимости мощностей генерации от параметров лазера, конкретной схемы заведения накачки и т.д. проведено не было. В то же время, наличие такой информации является необходимым условием для создания оптимальных схем лазера для конкретных применений. Тем не менее, к моменту начала нашей работы отсутствовало систематическое описание свойств лазера, в частности, его мощностных характеристик, тогда как наличие такой информации необходимо для создания лазера с оптимальными параметрами для конкретных применений, например, для получения генерации с максимальной эффективностью. Отметим, что в предыдущих работах эффективность генерации составляла величины порядка 10%, что существенно меньше эффективности, получаемой в традиционных ВКР-лазерах и достигающей 80-90% (см. например [8]).

При использовании ВКР-лазеров со случайной распределенной обратной связью в качестве распределенных усилителей существенным становится другое требование - максимально равномерного распределения мощности генерации вдоль волоконного световода для уменьшения шум-фактора усилителя [9]. Поэтому актуальной задачей является изучение распределений мощности генерации вдоль волокна. Кроме того, знание о продольных распределениях мощности поможет провести оптимизацию выходных мощностей лазера.

Наконец, для получения генерации в определенных диапазонах ин-

фрактального спектра в настоящий момент используются многокаскадные ВКР-лазеры с резонаторами, образованными точечными отражателями [10]. Естественным вопросом ставится возможность каскадной генерации в лазере со случайной распределенной обратной связью и целесообразность ее использования, т.е. эффективность каскадной генерации.

Цель работы

Основная цель данной работы сформулирована как изучение мощностных характеристик волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью, включая продольные распределения и выходные мощности генерации первой и второй стоксовых компонент.

Задачи работы

1. Изучение продольных распределений мощности генерации волоконных ВКР-лазеров со случайной распределенной обратной связью в различных конфигурациях;
2. Изучение выходных мощностных характеристик волоконных ВКР-лазеров со случайной распределенной обратной связью, проведение оптимизации параметров лазера для достижения высокоэффективной генерации;
3. Изучение возможности каскадной генерации в волоконном ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью.

Научная новизна

В работе проведено экспериментальное и численное исследование мощностных характеристик генерации в волоконном лазере нового типа, сколько-нибудь полного описания свойств которого до настоящего времени не существовало.

Впервые измерены продольные распределения мощности генерации вдоль волоконного световода в различных схемах лазера ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью. Впервые проведена оптимизация параметров лазера и получена высокоэффективная генерация. Впервые показано существенное влияние слабых точечных отражателей на выходных торцах лазера на параметры генерации. Впервые получена высокоэффективная каскадная генерация второй стоксовой компоненты в ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью.

Практическая значимость

Значимость полученных результатов обусловлена обширным спектром возможных применений изучаемого лазера. Простота его исполнения, а также сравнимые со стандартными ВКР-лазерами, использующими другой тип обратной связи, мощностные и спектральные характеристики делают его привлекательной заменой стандартным ВКР-лазерам при создании перестраиваемых, многоволновых лазеров, в задачах удвоении частоты, для создания распределенных ВКР-усилителей в сверхдальних оптических линиях связи и в сенсорных системах удаленного типа. Результаты и рекомендации, изложенные в работе, позволяют провести оптимизацию мощностных характеристик лазера для каждого конкретного применения.

Положения, выносимые на защиту

1. Продольные распределения мощности генерации в ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью различаются для схем лазера с разным направлением распространения волны накачки. В схеме с обратной накачкой распределение мощности генерации имеет единственный максимум, который достигается у выходного торца волокна, тогда как в одноплечевой схеме присутствует второй максимум мощности, отстоящий от точки ввода накачки на расстояние, зависящее от мощности накачки.
2. В волоконном ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью возможна генерация с высокой эффективностью. В схеме с прямой накачкой максимальная эффективность достигается при оптимальной длине волокна, зависящей от мощности накачки. В схеме с обратной накачкой и одноплечевой схеме максимальная эффективность достигается при длине волокна, обеспечивающей минимальный порог.
3. Слабые точечные отражатели принципиально изменяют мощностные характеристики волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью, а именно, уменьшают порог генерации первой и второй стоксовой компонент, а также приводят к изменению дифференциальной эффективности генерации.
4. Обратная связь за счет рэлеевского рассеяния позволяет получать высокоэффективную каскадную генерацию второй стоксовой компоненты при достаточной величине ВКР-усиления.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях: Всероссийская конференция по волоконной оптике (12-14 октября 2011 г., Пермь), Российский семинар по волоконным лазерам (27-30 марта 2012 г., Новосибирск), Международная конференция Nonlinear Photonics (17-21 июня 2012 г., Колорадо Спрингс, США), Международная конференция CLEO Europe – IQEC (12-16 мая 2013 г., Мюнхен, Германия), Международная конференция LPHYS'13 (15-19 июля 2013 г., Прага, Чехия), Международная конференция Nonlinear Photonics (27-31 июля 2014 г., Барселона, Испания).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 7 статьях в российских и зарубежных рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий Высшей аттестационной комиссии [A1-A7], а также в 6 тезисах и сборниках трудов всероссийских и международных конференций [A8-A13].

Личный вклад

Основные результаты получены автором лично. Автор активно участвовал во всех этапах исследований: от планирования экспериментов до обсуждения результатов, теоретического анализа и подготовки статей.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, и заключения. Полный объем диссертации **109** страниц текста с **43** рисунками. Список литературы содержит **87** наименований.

Содержание работы

Во **введении** приведен обзор исследований, посвященных лазерной генерации в средах с нерегулярной обратной связью, и история создания первого волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью. Формулируются цели данной работы и обсуждается ее актуальность. Приведены краткое содержание работы и защищаемые положения.

В **первой главе** рассматриваются принципы создания усиления и обратной связи в исследуемом лазере. Даются основные сведения о

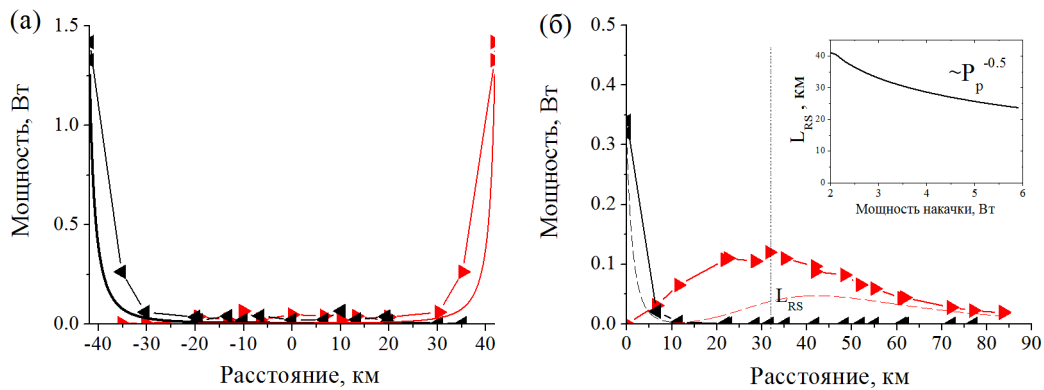


Рис. 1. Продольные распределения мощности генерации (а) в схеме с обратной накачкой (симметричная конфигурация). (б) в одноплечевой схеме. Черным – мощность обратной волны, серым – мощность прямой волны. Линиями – численный счет.

процессе вынужденного комбинационного рассеяния и обратном рэлеевском рассеянии, а также о способах измерения соответствующих констант в волоконном световоде. Дан краткий обзор типичных свойств генерации лазера: мощностных, спектральных, временной динамики и выходного качества пучка. Рассмотрены все основные схемы ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью. Приведено описание численной модели баланса мощностей, с помощью которой в следующих главах проводилось численное моделирование мощностных характеристик лазера.

Вторая глава посвящена изучению продольных распределений мощности в разных схемах волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью. Описана экспериментальная методика, с помощью которой измерялись продольные распределения мощности. Представлены экспериментально полученные продольные распределения в схеме с односторонней накачкой из центра. Эта схема не представляет интерес с точки зрения получения высокоэффективной генерации и рассматривается с целью верификации численной модели, а также для измерений параметров волокна, используемых для дальнейшего проведения численного счета. Рассмотрены продольные распределения в схеме с прямой накачкой, и представлено аналитическое решение балансной модели, полученное Е. В. Подивиловым. Показано, что обратная связь за счет рэлеевского рассеяния вносит значительный вклад в эволюцию мощности всюду вдоль волокна. Экспериментально и численно изучены продольные распределения в схеме с обратной накачкой, и показано, что распределение мощности генерации в этой системе имеет единственный максимум, расположенный в точке ввода накачки (см. рис. 1а.).

Показано, что благодаря специфическому распределению обратная

связь за счет рэлеевского рассеяния в этой схеме существенна только в малой области вблизи точки ввода накачки. В остальной области наличием обратного рэлеевского рассеяния можно пренебречь. Наконец, экспериментально и численно исследованы распределения мощности в одноплечевой схеме. Показано, что в ней распределение обратной волны имеет максимум в точке ввода накачки, в то время как распределение прямой волны генерации имеет максимум в точке $z = L_{RS}$, где $L_{RS} \sim 1/\sqrt{P_p}$ (рис. 1б). В этой схеме влияние обратного рэлеевского рассеяния существенно всюду вдоль волокна.

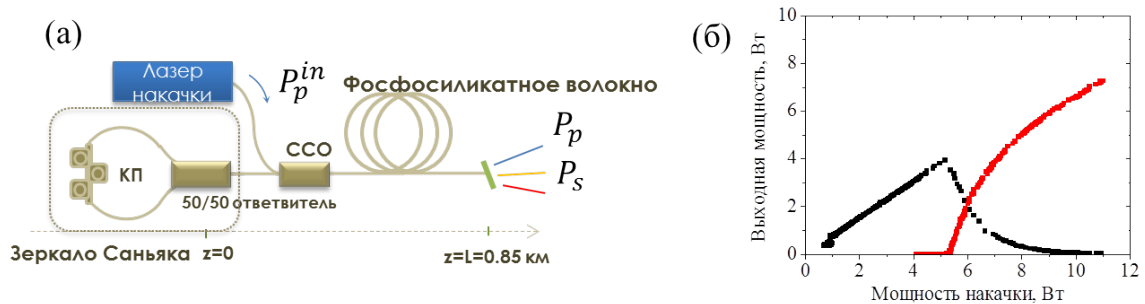


Рис. 2. (а) Схема ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью с прямой накачкой. (б) Выходные мощности накачки (черным) и генерации (серым).

В **третьей главе** рассмотрены выходные мощности генерации в разных схемах. Приведены аналитические выражения для пороговой мощности генерации в трех рассматриваемых схемах, указан принцип вычисления оптимальной длины волокна для минимизации порога генерации. Затем поочередно рассмотрены выходные мощностные характеристики для схемы с прямой накачкой, схемы с обратной накачкой, и одноплечевой схемы. Проведено сравнение экспериментальных данных с численным счетом на основе балансной модели. Показано, что максимальная эффективность генерации в схеме с прямой накачкой достигается при оптимальной длине волокна, которая должна совпадать с длиной усиления (положением максимума мощности генерации) при данной мощности накачки. Экспериментально продемонстрирована высокоэффективная генерация в схеме с прямой накачкой, полученная благодаря оптимизации длины лазера (см. рис. 2).

Показано, что в схеме с обратной накачкой и в одноплечевой схеме происходит генерация обратной волны стоксовой компоненты с постоянной дифференциальной эффективностью всюду над порогом, достигающей порядка 100% (рис. 3). Величина дифференциальной эффективности при этом слабо зависит от параметров волокна и от его длины. Этому способствуют специфические распределение мощности генерации в этих схемах — мощность генерируется в малой области неистощенной накачки и, таким образом, не затухает за счет линейных потерь и испы-

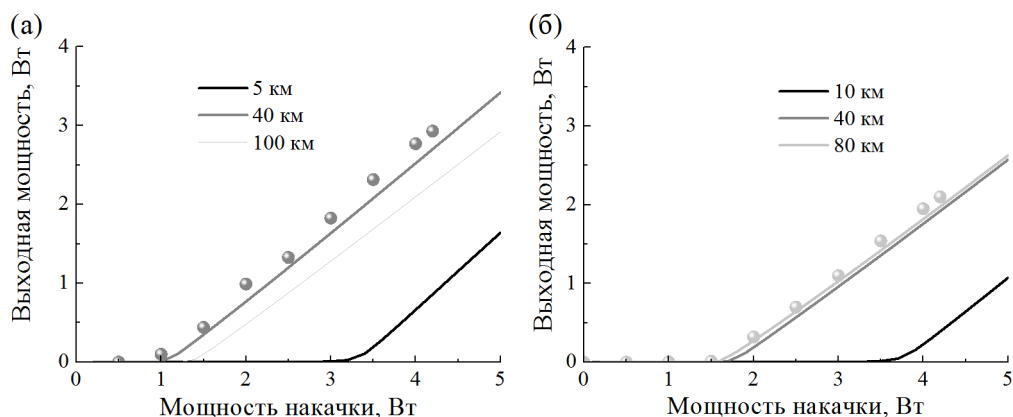


Рис. 3. Выходные мощности генерации для лазеров разной длины (а) Схема с обратной накачкой (указана длина лазера в несимметричной конфигурации) (б) Одноплечевая схема. Точками - экспериментальные данные.

тывает максимальное усиление. Следовательно, максимальная эффективность генерации в таких схемах может быть получена при использовании длин волокна, приводящих к минимальному порогу генерации.

Наконец, рассмотрен такой важный с точки зрения практических применений эффект, как влияние на мощностные характеристики паразитных точечных отражений, которые могут возникать на выходных торцах волокна в процессе проведения эксперимента. Как было показано, наличие слабых отражений может существенно понизить порог первой и второй стоксовых компонент, а также принципиально изменить дифференциальную эффективность генерации прямой и обратной волн. Таким образом, для получения стабильных во времени мощностных характеристик ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью необходимо обеспечивать отсутствие паразитных отражений.

Четвертая глава посвящена изучению возможности каскадной генерации в ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью. На основе балансной модели, включающей в себя уравнения на вторую стоксову компоненту, выполнен расчет порогов каскадной генерации для разных схем и показано, что порог генерации минимален в схеме с прямой накачкой благодаря наиболее равномерному распределению мощности первой стоксовой компоненты в ней. Продемонстрирована экспериментальная реализация ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью с высокоэффективной каскадной генерацией: получено 5.2 Вт мощности второй стоксовой компоненты из 11.1 Вт накачки (см. рис. 4).

В **заклучении** сформулированы основные результаты работы.

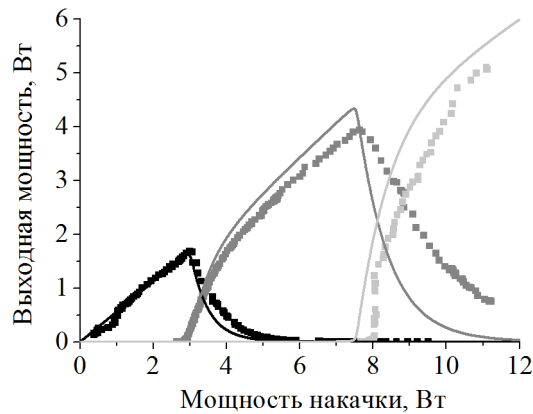


Рис. 4. Выходные мощности накачки (синим), первой (оранжевым) и второй (красным) стоксовых компонент в волоконном ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью. Сплошными линиями - численный счет.

Основные результаты

Приведем основные результаты диссертационной работы:

1. Экспериментально показано, что форма продольных распределений мощности генерации существенно различается в разных схемах волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью. В схеме с обратной накачкой единственный максимум мощности генерации достигается у выходного торца волокна — в точке ввода накачки. В одноплечевой схеме присутствует второй, меньший максимум мощности, отстоящий от точки ввода накачки на расстояние, падающее с ростом мощности накачки по обратному корневому закону.
2. Экспериментально продемонстрирована высокоэффективная генерация в волоконном ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью. В схеме с прямой накачкой после оптимизации длины волокна получено 7 Вт мощности генерации на длине волны 1308 нм из 11 Вт накачки. Показано, что в схеме с обратной накачкой и одноплечевой схеме благодаря сильно неоднородному распределению мощности обратной волны достигается дифференциальная эффективность генерации, близкая к 100%, независящая от мощности накачки и слабо зависящая от длины волокна. Максимальная полная эффективность достигается при минимальном пороге. Экспериментально получено 3 Вт и 2 Вт мощности генерации с дифференциальной эффективностью 92% и 80% в схеме с обратной накачкой и одноплечевой схеме соответственно на длине волны 1550 нм из 4 Вт мощности накачки. Эффективность генерации составляет 75% и 50% соответственно.

3. Экспериментально показано, что слабые точечные отражатели на выходных торцах принципиально изменяют мощностные характеристики волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью. Наличие слабых точечных отражателей величины $R \sim 10^{-3}$ в лазере длиной 2 км приводит к снижению порога генерации с 5.5 Вт до 4 Вт, а также к изменению дифференциальной эффективности генерации в прямом и обратном направлении. Наличие $R \sim 5 \cdot 10^{-5}$ в лазере длиной 11 км приводит к снижению порога каскадной генерации с 12.5 до 6.6 Вт.
4. Экспериментально показано, что в волоконном ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью возможна высокоэффективная каскадная генерация. Наименьший порог генерации достигается в схеме с прямой накачкой благодаря равномерному распределению мощности первой стоксовой компоненты в ней. В этой схеме получено 5.2 Вт генерации второй стоксовой компоненты из 11.1 Вт накачки. Эффективность преобразования составляет 47%.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Churkin D. V., Vatnik I. D., Turitsyn S. K. et al. Random distributed feedback Raman fiber laser operating in a 1.2 μm wavelength range // *Laser Phys.* 2011. Vol. 21, no. 8. P. 1525–1529.
- A2. Vatnik I. D., Churkin D. V., Babin S. A. et al. Cascaded random distributed feedback Raman fiber laser operating at 1.2 μm . // *Opt. Express.* 2011. Vol. 19, no. 19. P. 18486–94.
- A3. Чуркин Д. В., Эль-Тахер А. Е., Ватник И. Д., Бабин С. А. Исследование продольного распределения генерируемой мощности в волоконном ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью и с односторонней накачкой // *Квантовая электроника.* 2012. Т. 42, №– 9. С. 774–777.
- A4. Vatnik I. D., Churkin D. V., Babin S. A. Power optimization of random distributed feedback fiber lasers // *Opt. Express.* 2012. Vol. 20, no. 27. P. 28033.
- A5. Бабин С. А., Ватник И. Д. Волоконные лазеры со случайной распределенной обратной связью на рэлеевском рассеянии // *Автометрия.* 2013. Т. 49, №– 4. С. 3–29.
- A6. Babin S. A., Vatnik I. D., Laptev A. Y. et al. High-efficiency cascaded Raman fiber laser with random distributed feedback // *Opt. Express.* 2014. Vol. 22, no. 21. P. 24929.

- A7. Vatnik I. D., Churkin D. V., Podivilov E. V. et al. High-efficiency generation in a short random fiber laser // *Laser Phys. Lett.* 2014. Vol. 11, no. 7. P. 075101.
- A8. Ватник И.Д., Чуркин Д. В., Бабин С.А. Волоконный ВКР-лазер со случайной распределенной обратной связью в диапазоне 1.2 мкм // В кн.: Сб. трудов Всероссийской конференции по волоконной оптике, Пермь, 2011. Специальный выпуск Фотон-экспресс, 94, А9-3.
- A9. Подивилов Е. В., Чуркин Д. В., Ватник И. Д. и др. Продольное распределение мощности генерации в волоконном ВКР-лазере со случайной распределённой обратной связью на рэлеевском рассеянии // В кн.: Материалы российского семинара по волоконным лазерам, Новосибирск, 2012. С. 92-93.
- A10. Churkin D. V., Vatnik I. D., Babin S. A. Power and spectral optimization of random distributed feedback fiber lasers // *Proc. of the Advance Photonics Congress, Colorado Springs, USA, 2012*, JM5A.50.
- A11. Vatnik I. D., Churkin D. V., Babin S. A. Spectral width optimization in random DFB fiber laser // *Proc. of The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO®/Europe-IQEC)*, Munich, Germany. 2013. CJ-P.19.
- A12. Vatnik I. D., Churkin D. V., Babin S. A. Random fiber laser based on Rayleigh scattering with ultimate efficiency // *22th International Laser Physics Workshop (LPHYS'13)*, July 15–19, Prague, Czech Republic, 2013.
- A13. Vatnik I. D., Churkin D. V., Podivilov E. V., Babin S. A. Random distributed feedback fiber laser of ultimate efficiency // *Proc. of Nonlinear Photonics, Barcelona, Spain, 2014*, P. NW4A

Список цитируемых работ

1. Turitsyn S. K., Babin S. A., El-Taher A. E. et al. Random distributed feedback fibre laser // *Nature Photon.* 2010. Vol. 4, no. 4. P. 231–235.
2. Agrawal G. P. *Nonlinear fiber optics* // Elsevier Academic Press, 2006. P. 552.
3. El-Taher A. E., Harper P., Babin S. A. et al. Effect of Rayleigh-scattering distributed feedback on multiwavelength Raman fiber laser generation // *Opt. Lett.* 2011. Vol. 36, no. 2. P. 130.
4. Babin S. A., El-Taher A. E., Harper P. et al. Tunable random fiber laser // *Phys. Rev. A.* 2011. Vol. 84, no. 2. P. 021805.
5. Jia X.-H., Rao Y.-J., Peng F. et al. Random-lasing-based distributed fiber-optic amplification // *Opt. Express.* 2013. Vol. 21, no. 5. P. 6572.
6. Martins H., Marques M. B., Frazão O. 300 km-ultralong Raman fiber lasers using a distributed mirror for sensing applications. // *Opt. Express.* 2011. Vol. 19, no. 19. P. 18149–54.
7. Churkin D. V., Babin S. A., El-Taher A. E. et al. Raman fiber lasers with a random distributed feedback based on Rayleigh scattering // *Phys. Rev. A.* 2010. Vol. 82, no. 3. P. 033828.
8. Feng Y., Taylor L. R., Calia D. B. 150 W highly-efficient Raman fiber laser // *Opt. Express.* 2009. Vol. 17, no. 26. P. 23678–83.
9. Headley C., G. P. Agrawal G. P. *Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems* // Elsevier Academic Press, 2005. P. 534.
10. Bufetov I., Bubnov M. M., Larionov Y. V. et al. Highly efficient one- and two-cascade Raman lasers based on phosphosilicate fibers // *Laser Phys.* 2003. Vol. 13, no. 2. P. 234–239.

Подписано к печати «___» _____ 2015 г.
Формат бумаги 60x84 1/16. Объем 1 печ. л.
Тираж __ экз. Заказ № __.

Отпечатано “Полиграфическая компания, ИП Малыгин А. М.”, 630090
Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева 6/1.