

Волоконный ВКР-лазер на основе 7-сердцевинного световода с перекрёстной связью между сердцевинами

А.В.Достовалов, М.И.Скворцов, А.А.Вольф, В.И.Лабунцов, О.Н.Егорова,
С.Л.Семёнов, С.А.Бабин

Представлены результаты работы по созданию волоконного ВКР-лазера на основе многосердцевинного световода с высокоотражающими волоконными брэгговскими решётками, записанными с помощью фемтосекундного лазерного излучения в периферийных сердцевинах. Приведены мощностные и спектральные характеристики ВКР-лазера, выходная мощность которого на длине волны 1090 нм составила 2.5 Вт. Продемонстрировано уменьшение спектральной ширины линии генерации за счёт ослабления нелинейных эффектов из-за увеличения эффективной площади моды в многосердцевинном световоде по сравнению с волоконным ВКР-лазером на основе стандартного одномодового световода.

Ключевые слова: ВКР-лазер, фемтосекундная модификация показателя преломления, многосердцевинное волокно.

1. Введение

Волоконные лазеры на основе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) являются перспективными источниками лазерного излучения с длинами волн, которые недоступны волоконным лазерам на основе активных волокон, легированных ионами редкоземельных элементов. На сегодняшний день продемонстрированы различные конфигурации ВКР-лазеров, в том числе со случайной распределенной обратной связью (СРОС) на основе рэлеевского рассеяния в одномодовом волокне [1]. Замена одномодового волокна на двухсердцевинное волокно, в котором световедущие сердцевинки расположены настолько близко, что происходит перекачка излучения из одной сердцевинки в другую, позволяет в несколько раз уменьшить спектральную ширину линии генерации такого ВКР-лазера [2]. Спектральная ширина линии генерации 0.55 нм данного лазера оказалась существенно меньше, чем ширина линии 1.8 нм ВКР-лазера со СРОС аналогичной конфигурации на основе одномодового (односердцевинного) волокна при выходной мощности 7 Вт. Показано, что сужение линии генерации обусловлено спектрально-селективными свойствами двухсердцевинного волокна со связью сердцевин и ослаблением влияния нелинейных эффектов (фазовой самомодуляции и кросс-модуляции) вследствие увеличения эффективной площади моды пропорционально числу сердцевин.

А.В.Достовалов, М.И.Скворцов, А.А.Вольф. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: dostovalov@iae.nsk.su; sls@fo.gpi.ru

В.И.Лабунцов, С.А.Бабин. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2

О.Н.Егорова. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Москва, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

С.Л.Семёнов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М.Дианова, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

Технология поточечной фемтосекундной лазерной записи волоконных брэгговских решёток (ВБР) [3], которая позволяет формировать ВБР в выбранных сердцевинах многосердцевинного световода с высокой точностью позиционирования, делает возможным создание новых схем ВКР-лазера с использованием данного типа волокон. Так, в [4] было показано, что применение в схеме ВКР-лазера со СРОС узкополосного отражателя на основе ВБР, записанной в одной из сердцевин двухсердцевинного волокна, вместо широкополосного зеркала Саньяка позволяет в два раза уменьшить ширину линии генерации. В данной работе представлен также метод дополнительной спектральной фильтрации за счёт записи на входе резонатора в разных сердцевинах двух смещённых вдоль волокна высокоотражающих ВБР, что приводит к образованию интерферометра Майкельсона при наличии связи сердцевин. Кроме того, авторами [4] показано, что применение ВБР в резонаторах ВКР-лазеров со СРОС на основе двухсердцевинного волокна улучшает стабильность генерации по сравнению со схемой ВКР-лазеров со СРОС с зеркалом Саньяка [2]. В связи с этим представляется перспективным дальнейшее увеличение числа сердцевин для создания новых схем ВКР-лазеров с улучшенными спектральными характеристиками.

В настоящей работе представлены результаты исследования спектральных характеристик ВКР-лазера на основе 7-сердцевинного световода и высокоотражающих ВБР, записанных в периферийных сердцевинах на входе и выходе резонатора с применением поточечной фемтосекундной лазерной записи.

2. Эксперимент

Семисердцевинный световод был изготовлен в НЦВО РАН (Москва); его параметры: диаметр поля моды на длине волны вблизи 1090 нм составил 6.4 мкм, расстояние между сердцевинами – 17.3 мкм, пассивные потери световода на длине волны ~1.1 мкм не превышали 2 дБ/км, коэффициент ВКР-усиления на стоксовой длине волны (~1090 нм) составил около 0.3 (Вт·км)⁻¹.

Схема ВКР-лазера на основе данного многосердцевинного световода приведена на рис. 1. Линейно поляризован-

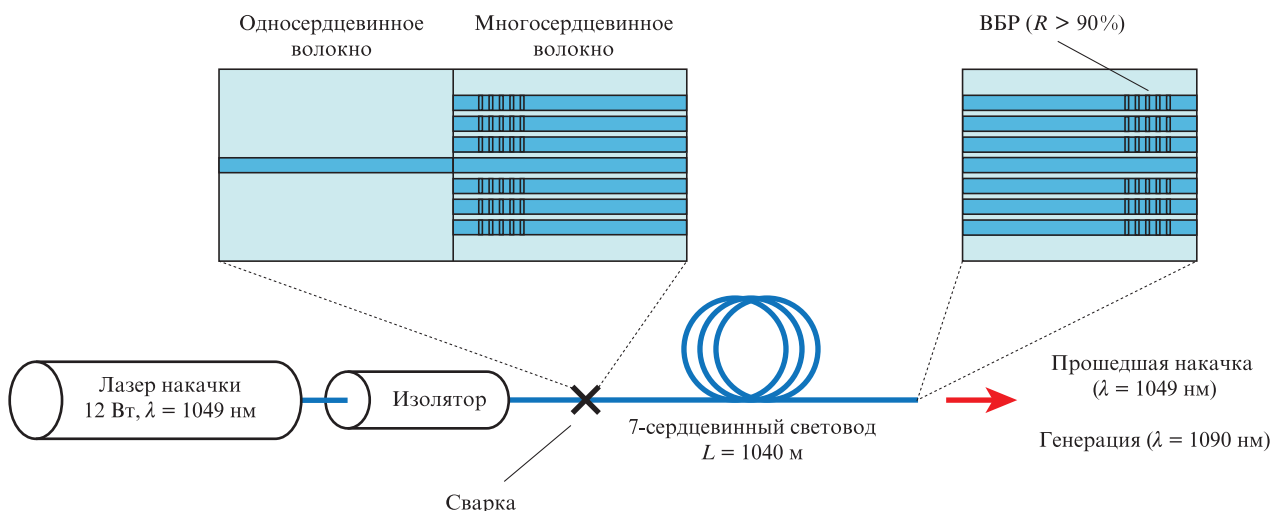


Рис.1. Схема ВКР-лазера на основе 7-сердцевинного световода.

ное излучение накачки с длиной волны ~ 1049 нм и мощностью до 12.5 Вт заходило в центральную сердцевину 7-сердцевинного световода через изолятор, устойчивый к воздействию мощного (свыше 10 Вт) излучения. Высокоотражающие ($R > 90\%$) волоконные брэгговские решётки с резонансной длиной волны ~ 1090 нм, соответствующей длине волны стоксовой генерации, были изготовлены во всех периферийных сердцевинах, как показано на рис.1. Сварка производилась с центральной сердцевиной волокна, в которой отсутствует ВБР, что позволило избежать нерезонансных потерь излучения накачки на входных ВБР.

Для разделения излучения, выходящего из семи сердцевин, использовался коллиматор Thorlabs F230FC-B, а для разделения излучения накачки и ВКР-генерации применялась дифракционная решётка Thorlabs GR50-1210. Таким образом, выходное излучение представляло собой 14 пространственно разделённых пучков, для выделения которых при измерении спектральных характеристик каждого из них использовалась диафрагма. Спектр генерации характеризовался при помощи оптического спектроанализатора Yokogawa AQ6370 с разрешением 20 пм.

На рис.2 приведены спектры ВКР-генерации (мощность ~ 2 Вт) и прошедшего излучения накачки (мощность ~ 0.3 Вт). Отстройка между длинами волн накачки

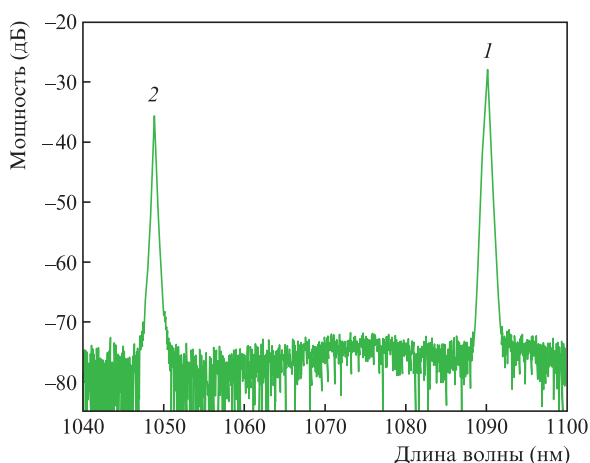


Рис.2. Спектры ВКР-генерации (1) и прошедшего излучения накачки (2).

и генерации составляет 12.3 ТГц, что близко к величине отстройки, соответствующей максимальному значению усиления ВКР-генерации для GeO_2 -световода.

Зависимости выходной мощности генерации стоксовой компоненты и прошедшего излучения накачки от входной мощности накачки представлены на рис.3. Порог генерации волоконного ВКР-лазера достигался при мощности накачки 3 Вт. Относительно высокое значение порога генерации ВКР-лазера с резонатором на основе высокоотражающих ВБР обусловлено уменьшением коэффициента ВКР-усиления из-за увеличения эффективной площади моды связанных сердцевин [5]. Суммарная выходная мощность ВКР-генерации (с учётом всех сердцевин волокна) при максимальной мощности накачки 12.5 Вт составила 2.55 Вт, тогда как максимальная выходная мощность из центральной сердцевины – примерно 2.25 Вт.

На рис.4,а представлены спектры генерации стоксова излучения, выходящего из центральной сердцевины, в зависимости от выходной мощности. С увеличением выходной мощности наблюдается уширение спектральной линии генерации, которое характерно также для односердцевинных ВКР-лазеров; оно связано с влиянием нелинейных эффектов фазовой самомодуляции и кросс-модуляции на ширину линии генерации [2, 6]. Увеличение эффективной площади моды уменьшает влияние данных

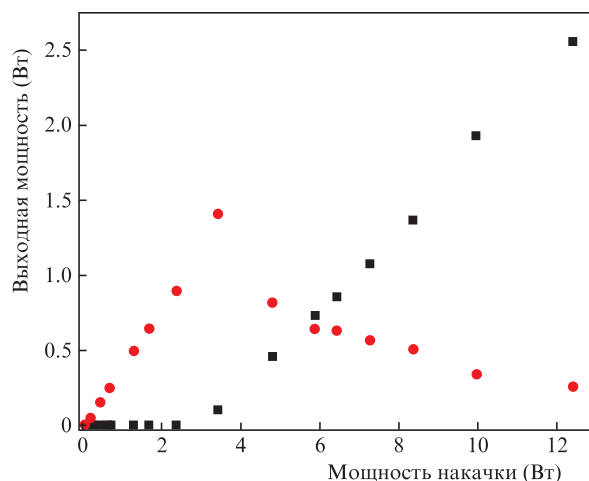


Рис.3. Зависимости выходной мощности ВКР-генерации (■) и прошедшего излучения накачки (●) от входной мощности накачки.

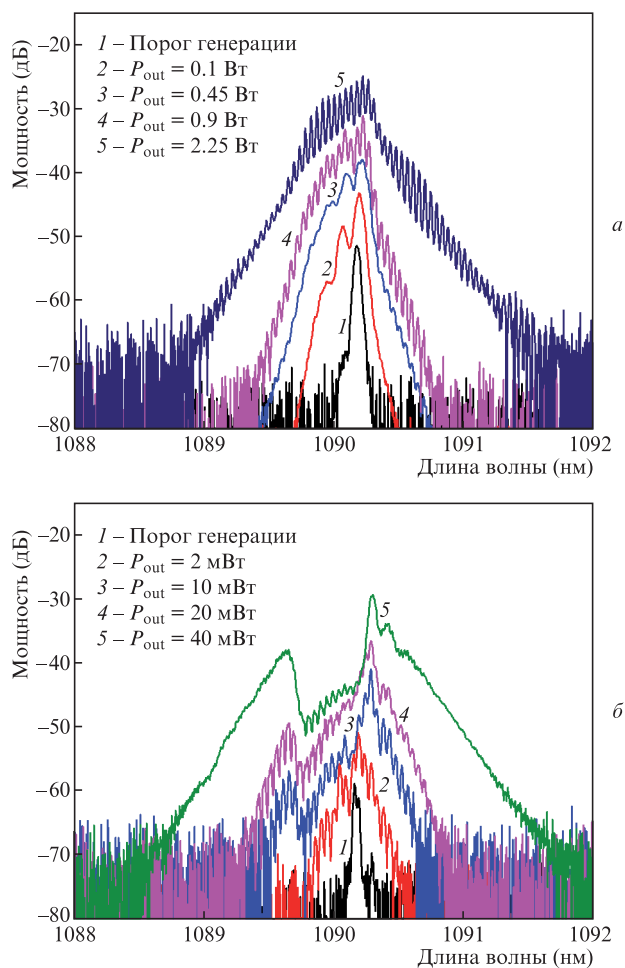


Рис.4. Спектры генерации стоксова излучения, выходящего из центральной (а) и периферийной сердцевины (б) в зависимости от выходной мощности. Цветной вариант рисунка помещён на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

эффектов из-за уменьшения коэффициента нелинейности, что приводит к сужению линии генерации. При максимальной выходной мощности из центральной сердцевины примерно 2.25 Вт ширина спектра излучения из нее составляет не более 320 пм (по уровню -3 дБ). Согласно данным предыдущих экспериментов и аналитической модели [6] ширина спектра излучения для односердцевинно-

го световода при аналогичной конфигурации лазера и соответствующей выходной мощности составляет ~ 800 пм. На рис. 4,б приведены спектры ВКР-генерации стоксова излучения из периферийной сердцевины в зависимости от мощности выходного излучения. В центральной области спектра (1090 нм) наблюдается провал, связанный с наличием высокоотражающей ВБР в периферийной сердцевине на данной длине волны. В спектрах также видны интерференционные эффекты, природа которых требует дальнейшего изучения.

3. Заключение

Таким образом, селективная запись высокоотражающих ВБР только в периферийных сердцевинах многосердцевинного световода позволила получить эффективную ВКР-генерацию мощностью ~ 2.5 Вт на стоксовой длине волны 1090 нм, что открывает новые возможности для дальнейшей оптимизации схем волоконных лазеров на основе многосердцевинных световодов. Исследование спектральных характеристик волоконного ВКР-лазера на основе 7-сердцевинного световода с записанными ВБР продемонстрировало существенное уменьшение спектральной ширины линии генерации данного световода (по сравнению с ВКР-лазером с односердцевинным световодом) вследствие увеличения эффективной площади моды, что приводит к уменьшению коэффициента нелинейности и, соответственно, уменьшению влияния нелинейных эффектов на ширину линии генерации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-70132.

1. Turitsyn S.K., Babin S.A., El-Taher A.E., Harper P., Churkin D.V., Kablukov S.I., Ania-Castañón J.D., Karalekas V., Podivilov E.V. *Nat. Photonics*, **4**, 231 (2010).
2. Budarnykh A.E., Lobach I.A., Zlobina E.A., Velmiskin V.V., Kablukov S.I., Semjonov S.L., Babin S.A. *Opt. Lett.*, **43**, 567 (2018).
3. Dostovalov A.V., Wolf A.A., Parygin A.V., Zyubin V.E., Babin S.A. *Opt. Express*, **24**, 16232 (2016).
4. Skvortsov M.I., Abdullina S.R., Wolf A.A., Dostovalov A.V., Vlasov A.A., Lobach I.A., Wabnitz S., Babin S.A. *Opt. Lett.*, **44**, 295 (2019).
5. Rottwitz K., Povlsen J.H. *J. Lightwave Technol.*, **23**, 3597 (2005).
6. Babin S.A., Zlobina E.A., Kablukov S.I., Podivilov E.V. *Sci. Rep.*, **6**, 1 (2016).