

Узкополосный волоконный ВКР-лазер на основе двухсердцевинного световода с ВБР, записанными фемтосекундным излучением

М.И.Скворцов, С.Р.Абдуллина, А.А.Вольф, И.А.Лобач, А.В.Достовалов, С.А.Бабин

Представлены характеристики ВКР-лазеров, реализованных на основе двухсердцевинного волоконного световода. В качестве зеркал резонатора использовались волоконные брэгговские решетки (ВБР), селективно записанные в выбранных сердцевинах фемтосекундным излучением. Проведена оптимизация конфигурации лазера по коэффициенту отражения выходной ВБР. Продемонстрирована возможность дополнительной спектральной фильтрации, основанной на формировании интерферометра Майкельсона в резонаторе лазера с помощью пары ВБР в разных сердцевинах.

Ключевые слова: волоконный лазер, ВКР-лазер, волоконная брэгговская решетка, фемтосекундная модификация показателя преломления.

1. Введение

Лазеры на основе многосердцевинных световодов (МСС) являются перспективными источниками мощного узкополосного излучения. В случае распространения излучения по нескольким сердцевинам волоконного МСС уменьшается интенсивность при заданной мощности, что приводит к уменьшению влияния нелинейных эффектов, вызывающих уширение спектра лазерного излучения. Важной задачей при реализации лазеров на основе МСС является синхронизация фаз мод, распространяющихся в различных сердцевинах, что особенно актуально при больших расстояниях между ними, поскольку моды различных сердцевин в этом случае почти независимы из-за слабого перекрытия их полей. Для решения этой задачи обычно используются внешние элементы, например резонатор Тальбота [1] или волоконные брэгговские решетки (ВБР), записанные в многомодовом волокне с большим размером сердцевины [2].

Лазерам на основе активных многосердцевинных волокон [1–4] посвящено достаточно много работ, при этом нам известна только одна публикация [5], посвященная лазеру на основе пассивного двухсердцевинного световода (ДСС), в котором усиление достигается за счет вынужденного комбинационного рассеяния света. В ней впервые продемонстрирован ВКР-лазер со случайной распределенной обратной связью (СРОС) на основе 550-метрового ДСС типа «Панда», сохраняющего поляризацию (СП). В качестве плотного зеркала в конфигурации полуоткрытого резонатора использовалось широкополосное волоконное кольцевое зеркало, приваренное к той же сердцевине, в которую заводилось излучение накачки.

М.И.Скворцов, А.А.Вольф, И.А.Лобач, А.В.Достовалов, С.А.Бабин. Институт автоматки и электротехники СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; **С.Р.Абдуллина.** Институт автоматки и электротехники СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: abdullina.sofia@gmail.com

Поступила в редакцию 9 октября 2018 г.

Спектральная ширина линии генерации данного лазера оказалась в пять раз меньше, чем ширина линии ВКР-лазера со СРОС такой же конфигурации на основе односердцевинного СП волоконного световода, и составила 500 пм при мощности 7 Вт. В работе [5] показано, что сужение линии генерации в ДСС обусловлено ослаблением нелинейных эффектов из-за увеличения эффективной площади моды и спектрально-селективными свойствами ДСС, проявляющимися из-за связи мод сердцевин (характерная длина биений составила 5–10 см). В классической схеме ВКР-лазера с кольцевым зеркалом на входе и прямым сколом волокна на выходе, которая также была реализована авторами работы [5], ширина линии генерации в припороговом режиме составила около 1 нм и увеличивалась до 3 нм при выходной мощности 5.9 Вт. Другие схемы ВКР-лазеров на основе двух- и многосердцевинных световодов в литературе не описаны, между тем реализация и исследование характеристик как случайных, так и классических ВКР-лазеров на основе данного типа волокон представляет большой интерес.

В настоящей работе представлены характеристики различных конфигураций ВКР-лазера с линейным резонатором, сформированным на противоположных концах ДСС длиной 550 м. Для формирования резонатора использовалась технология поточечной фемтосекундной записи [6], позволяющая селективно записывать ВБР в одной или двух сердцевинах с высокой точностью позиционирования, что невозможно в случае записи решеток УФ излучением.

2. Эксперимент

Двухсердцевинный световод был изготовлен в НЦВО РАН; его параметры: радиус сердцевины световода равен 3 ± 0.3 мкм, среднее расстояние между сердцевинами – 17.1 ± 0.3 мкм, потери на длине волны 1.06 мкм составили 2.2 дБ/км, коэффициент ВКР-усиления на стоковой длине волны 1.1 мкм составил $0.85–0.95 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$ [5].

Общая схема исследуемых в работе конфигураций представлена на рис.1. Линейно поляризованное излучение накачки с длиной волны 1050 нм и мощностью до

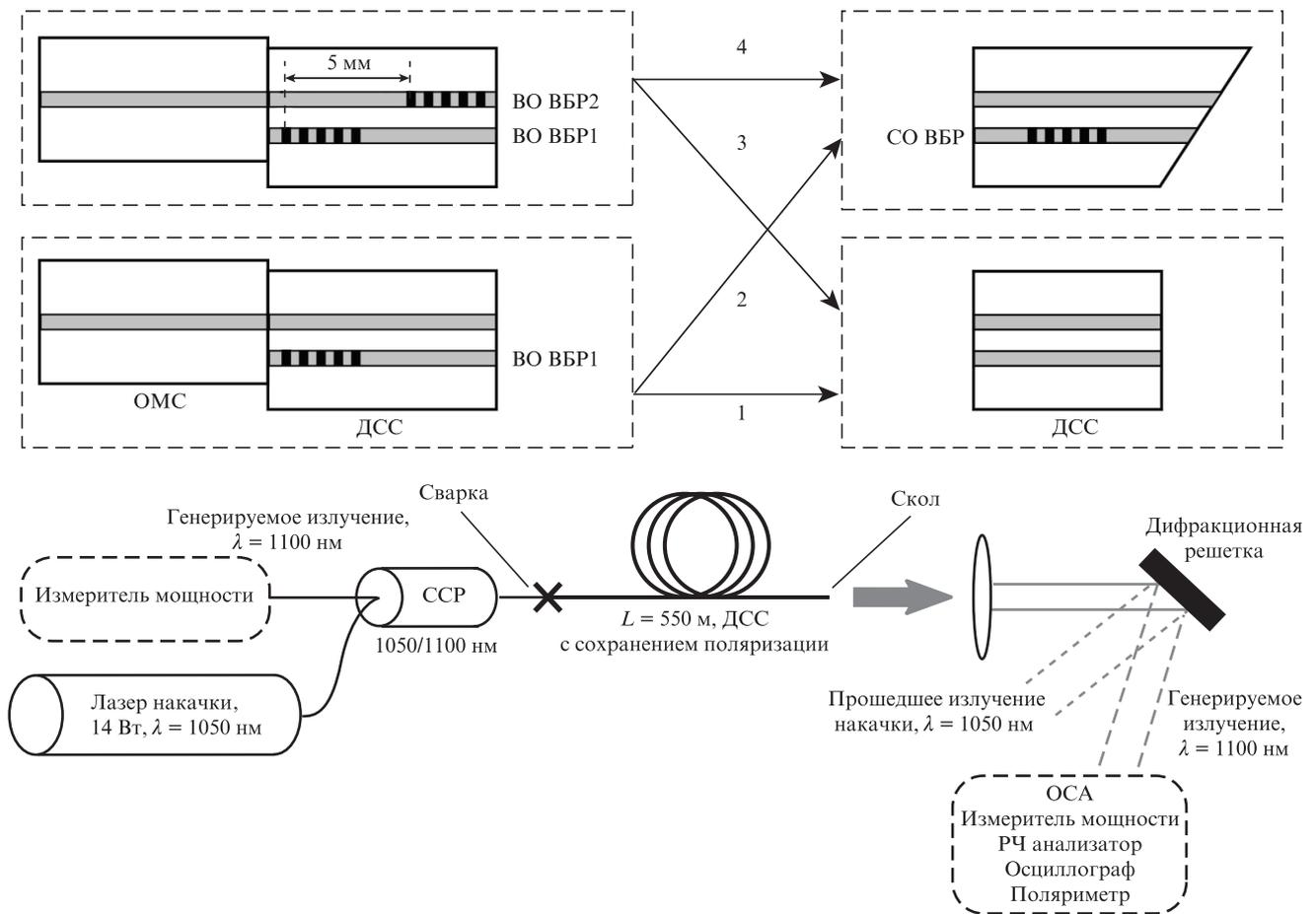


Рис.1. Общая схема эксперимента для различных конфигураций (1–4).

14 Вт вводилось в одну из сердцевин ДСС через спектрально-селективный разветвитель (ССР).

Сварка осуществлялась аппаратом Fujikura LZM-100, который позволяет выставлять поляризационные оси свариваемых СП волоконных световодов и осуществлять необходимое поперечное смещение. В другой сердцевине вблизи точки ввода накачки была записана узкополосная высокоотражающая ВБР (ВО ВБР1). Схема с разделением сердцевин для формирования плотного зеркала резонатора и для ввода накачки позволяет избежать нерезонансных потерь излучения накачки на входной ВБР. Другой конец ДСС (выход лазера) имел либо прямой скол, либо на нем была записана слабоотражающая ВБР (СО ВБР). При этом из-за сильной связи сердцевин было неважно, в какой из сердцевин записана выходная ВБР. Входная и выходная ВБР формировались методом поточечной записи излучением фемтосекундного лазера. Для обеспечения высокой точности позиционирования ВБР внутри МСС использовалась визуализация положения сердцевин и области модификации по двум поперечным координатам [6].

Мощность стоксовой компоненты, распространяющейся в противоположном по отношению к излучению накачки направлении (назад), в представленных конфигурациях была мала в связи с высоким коэффициентом отражения ВБР1 и большими потерями излучения в точках сварки и в спектрально-селективном разветвителе. Поэтому рассматривались характеристики стоксовой компоненты, распространяющейся сонаправленно с из-

лучением накачки (вперед). Для разделения излучения, выходящего из двух сердцевин, использовался коллиматор Thorlabs F230FC-B, а для разделения излучения накачки и ВКР-генерации применялась дифракционная решетка Thorlabs GR25-1210. Таким образом, на выходе наблюдались четыре пространственно-разделенных пучка. Спектр генерации регистрировался оптическим спектроанализатором (ОСА) Yokogawa AQ6370 с разрешением 20 пм. Для изучения модового состава излучения использовался радиочастотный анализатор спектра Agilent Signal Analyzer N9010A, при измерении динамических характеристик (флуктуаций мощности) применялись быстродействующий фотодиод (полоса пропускания 1 ГГц) и осциллограф Tektronix TDS 3032B. Степень поляризации излучения измерялась при помощи поляриметра Thorlabs PAN5710IR2.

На рис.2 приведены характеристики ВКР-лазера с высокоотражающей ($R_1 \approx 95\%$) узкополосной ($\delta\lambda_1 \approx 400$ пм) ВБР1 на входе и прямым сколом волокна на выходе резонатора (конфигурация 1 на рис.1). Пороговая мощность накачки составила около 4.7 Вт, максимальная мощность генерации стоксовой компоненты (здесь и далее суммарно из двух сердцевин) достигала 7 Вт при мощности накачки 11.7 Вт (рис.2,а). Отметим, что различие максимальных мощностей накачки для представленных в работе конфигураций обусловлено различными потерями в точке сварки ДСС с односердцевинным одномодовым световодом (ОМС), которые определяют мощность вводимого в резонатор излучения накачки.

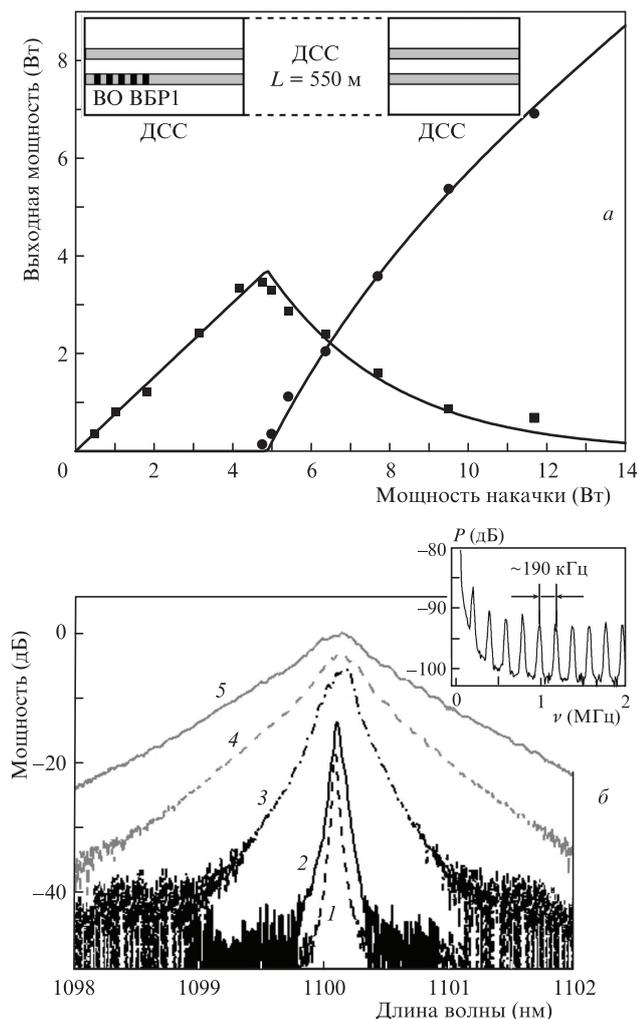


Рис.2. Зависимости выходной мощности прошедшего ДСС излучения накачки (■) и генерации (●) от входной мощности накачки для конфигурации резонатора с ВО ВБР1 на входе и прямым сколом на выходе (сплошные кривые – результаты численного моделирования) (а), а также спектры генерации при выходных мощностях 0.1 (1), 0.3 (2), 2 (3), 3.6 (4) и 6.9 Вт (5) (б). На вставке – радиочастотный спектр.

Сплошные кривые на рис.2,а соответствуют результатам численного моделирования, полученным при решении системы балансных уравнений для мощности накачки и стоксовых компонент [7] с соответствующими эффективными коэффициентами отражения на зеркалах резонатора R_1 (левое зеркало на входе) и R_r (правое зеркало на выходе) в качестве граничных условий. ВБР с коэффициентом отражения R , записанная в одной из сердцевин ДСС, ввиду сильной связи сердцевин эквивалентна зеркалу с эффективным коэффициентом отражения $R_{\text{eff}} = R/2$. Таким образом, для высокоотражающей ВБР1 можно положить $R_1 = 0.5$. Прямой скол в резонаторе эквивалентен широкополосному зеркалу с коэффициентом отражения $R_r = 0.04$. Численное моделирование с граничными условиями $R_1 = 0.5$, $R_r = 0.04$ хорошо согласуется с экспериментальными данными при значении коэффициента усиления $g_R = 0.95 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$ (см. рис.2,а). Ширина линии генерации (по уровню -3 дБ) в припороговом режиме составляет примерно 50 пм, растет с увеличением мощности и достигает 550 пм при максимальной мощности генерации 7 Вт (рис.2,б). По сравнению с аналогичной схемой с

кольцевым зеркалом на входе, получено значительное сужение спектра генерации, обусловленное тем, что вместо широкополосного кольцевого зеркала в схеме используется ВБР с шириной спектра отражения $\sim 400 \text{ пм}$. На вставке к рис.2,б представлен радиочастотный спектр генерации ВКР-лазера для конфигурации резонатора с прямым сколом. Межмодовое расстояние составляет 190 кГц, что соответствует длине резонатора 550 м.

С целью оптимизации характеристик ВКР-лазера прямой скол в резонаторе был заменен на узкополосную слабоотражающую ВБР. Задача оптимизации заключалась в понижении пороговой мощности накачки без значительного снижения уровня выходной мощности стоксовой компоненты. Для этого был проведен расчет пороговой мощности накачки и выходных мощностей генерируемого излучения, распространяющегося вперед и назад, при мощности накачки 12 Вт и $R_1 = 0.5$ для различных значений коэффициента отражения выходного зеркала R_r (рис.3). Значение мощности стоксовой компоненты, распространяющейся назад, приведено в точке до сварки ДСС с односердцевинным световодом. Численное моделирование показало, что в области значений $R_r = 0.05 - 0.15$ происходит наиболее сильное снижение пороговой мощности накачки, при этом выходная мощность генерации уменьшается практически линейно во всем диапазоне значений R_r . Поэтому для экспериментальной реализации лазера R_r выбран равным 0.15.

На рис.4 приведены характеристики ВКР-лазера, на выходе которого в одной из сердцевин записана ВБР с шириной спектра отражения $\delta\lambda \approx 120 \text{ пм}$ и коэффициентом отражения $2R_r \approx 0.3$ (конфигурация 2 на рис.1). Пороговая мощность накачки для этой конфигурации составила около 3.5 Вт, а максимальная мощность генерации достигла 6.2 Вт при мощности накачки около 11.5 Вт (рис.4,а), что сравнимо с мощностью генерации для конфигурации с прямым сколом. Результаты численного моделирования с граничными условиями $R_1 = 0.5$ и $R_r = 0.15$ согласуются с результатами эксперимента при $g_R = 0.85 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$. Измеренная ширина линии не превышает 140 пм во всем диапазоне мощностей излучения (рис.4,б), таким образом, она значительно меньше, чем в конфигурации с прямым сколом. Спектры формирующих резонатор ВО ВБР1 и СО ВБР показаны на рис.5 черной сплошной и штриховой кривыми. Селекция линии генерации осуществляется в данной схеме узкополосной выходной

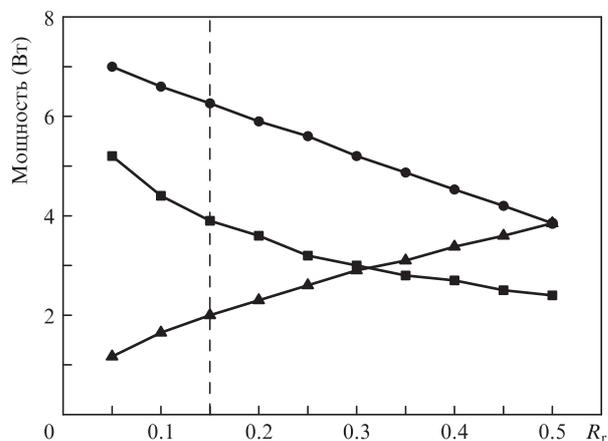


Рис.3. Зависимости пороговой мощности накачки (■) и выходной мощности излучения, распространяющегося вперед (●) и назад (▲), от коэффициента отражения выходного зеркала резонатора R_r .

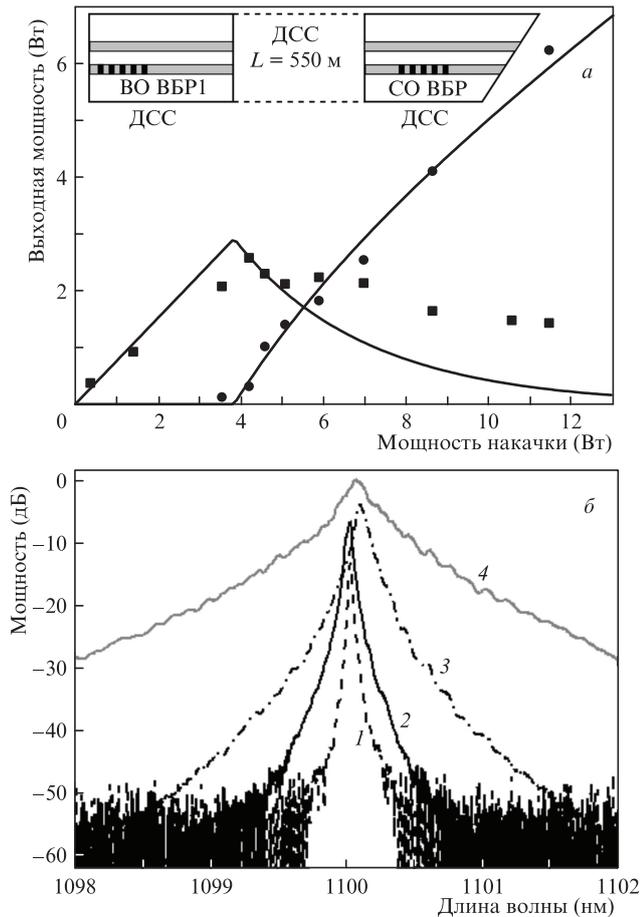


Рис.4. Зависимости выходной мощности прошедшего ДСС излучения накачки (■) и генерации (●) от входной мощности накачки для конфигурации резонатора с ВО ВБР1 на входе и СО ВБР на выходе (сплошные кривые – результаты численного моделирования) (а) и спектры генерации при выходных мощностях 0.3 (1), 1.4 (2), 2.55 (3) и 6.2 Вт (4) (б).

СО ВБР ($\delta\lambda \approx 120$ пм). В этой конфигурации получена стабильная генерация за счет ВБР, формирующих резонатор ВКР-лазера, тогда как в схеме случайного ВКР-лазера на ДСС с широкополосным кольцевым зеркалом [5] на временном масштабе ~ 1 мин в спектре генерации появляются и исчезают боковые резонансы с интервалом

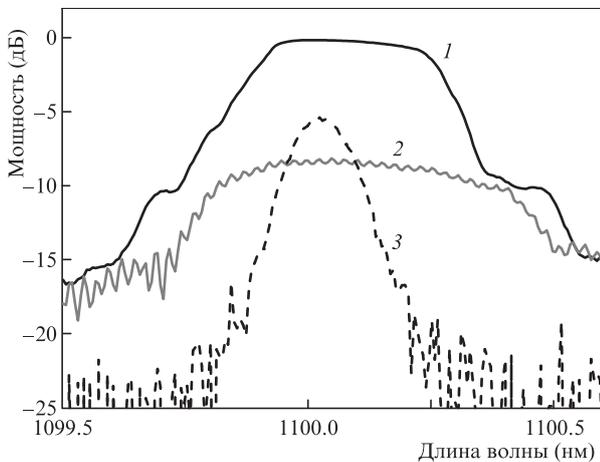


Рис.5. Спектры отражения решеток, формирующих резонатор ВКР-лазера: ВО ВБР1 (1), ВО ВБР2 (2) и СО ВБР (3).

~ 0.5 нм, связанные с нестабильностью спектральной селекции из-за взаимодействия мод сердцевин.

Для исследования возможности дополнительной спектральной фильтрации было предложено записать на входе лазера две высокоотражающие ВБР в разных сердцевинах с продольным смещением вдоль волокна (ВО ВБР1, 2, см. рис.1). Это приводит к образованию интерферометра Майкельсона благодаря перекачке излучения между сердцевинами ДСС, вследствие чего спектр генерации лазера становится промодулированным. Расстояние вдоль волокна между входными ВБР в такой конфигурации составило 5 мм, длина ВБР – 3 мм, точность позиционирования – менее 1 мкм. Спектры отражения входных ВО ВБР1, 2 приведены на рис.5, ширины спектров отражения составили около 400 и 650 пм соответственно. При измерении спектра отражения ВБР1 излучение вводилось через односердцевинный световод, приваренный к сердцевине ДСС, в которой была записана решетка, а при измерении спектра отражения ВБР2 односердцевинный световод подводился к ДСС без сварки.

На рис.6,б приведены спектры генерации ВКР-лазера с двумя ВО ВБР на входе и прямым сколом волокна на выходе (конфигурация 3, рис.1) при различных уровнях выходной мощности. Период модуляций в спектре гене-

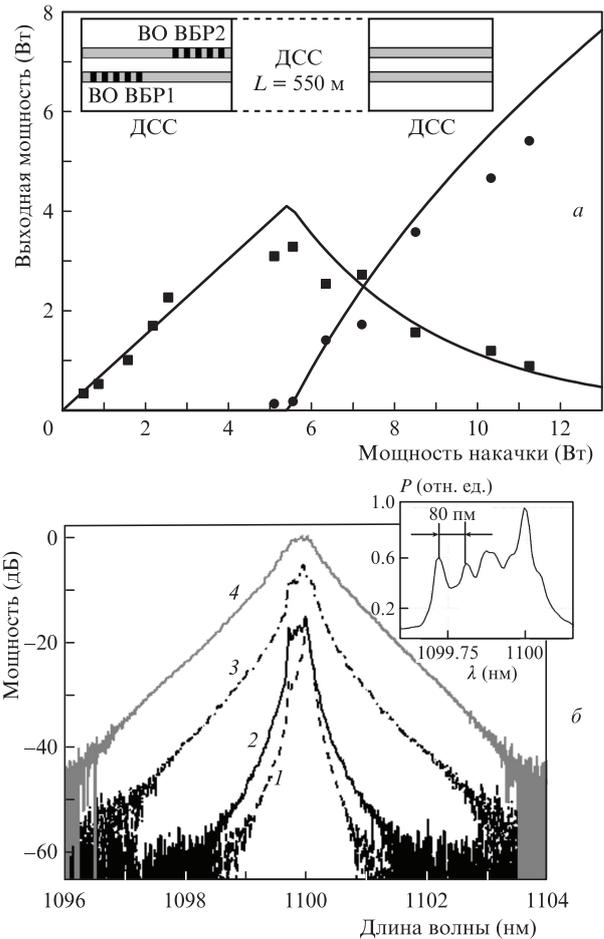


Рис.6. Зависимости выходной мощности прошедшего ДСС излучения накачки (■) и генерации (●) от входной мощности накачки для конфигурации резонатора с ВО ВБР1, 2 на входе и прямым сколом на выходе (сплошные кривые – результаты численного моделирования) (а) и спектры генерации при выходных мощностях 0.1 (1), 0.17 (2), 1.7 (3) и 5.4 Вт (4) (б). На вставке – спектр генерации при выходной мощности 0.17 Вт (линейный масштаб).

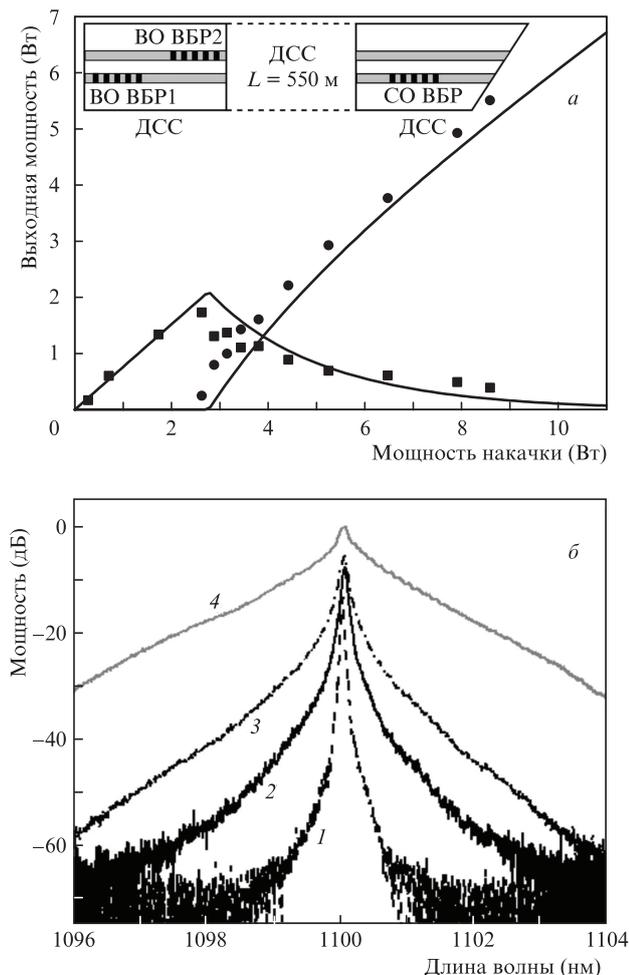


Рис.7. Зависимости выходной мощности прошедшего ДСС излучения накачки (■) и генерации (●) от входной мощности накачки для конфигурации резонатора с ВО ВБР1, 2 на входе и СО ВБР на выходе (сплошные линии – результаты численного моделирования) (а) и спектры генерации при выходных мощностях 0.25 (1), 1.6 (2), 1.6 (3) и 5.5 Вт (4) (б).

рации в припороговом режиме составил 80 пм (см. вставку к рис.6,б), что соответствует пикам пропускания интерферометра Майкельсона с разностью длин плеч 5 мм. Наличие такой структуры в спектре генерации предоставляет возможность получения многоволновой генерации и/или спектральной селекции пиков, ширина которых в припороговом режиме сравнима с величиной аппаратной функции анализатора (20 пм). Отметим, что общая ширина спектра генерации определяется шириной спектров отражения входных ВБР1, 2 и составляет около 500 пм (см. рис.6,б). Спектр генерации нестабилен во времени, перераспределение энергии между пиками происходит на временном промежутке в несколько секунд. Пороговая мощность накачки для такой схемы составляет около 4.5 Вт, максимальная мощность стоксовой компоненты – 5.4 Вт при мощности накачки 11 Вт (см. рис.6,а). Результаты численного моделирования с граничными условиями $R_1 = 0.9$, $R_r = 0.04$ согласуются с результатами эксперимента при $g_R = 0.85 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$.

Для реализации дополнительной селекции в конфигурации лазера с двумя входными ВО ВБР также была применена узкополосная ($\delta\lambda \approx 120 \text{ пм}$) слабоотражающая ВБР ($2R_r \approx 0.3$) на выходе лазера (конфигурация 4, рис.1), ее спектр отражения показан на рис.5 штриховой кривой.

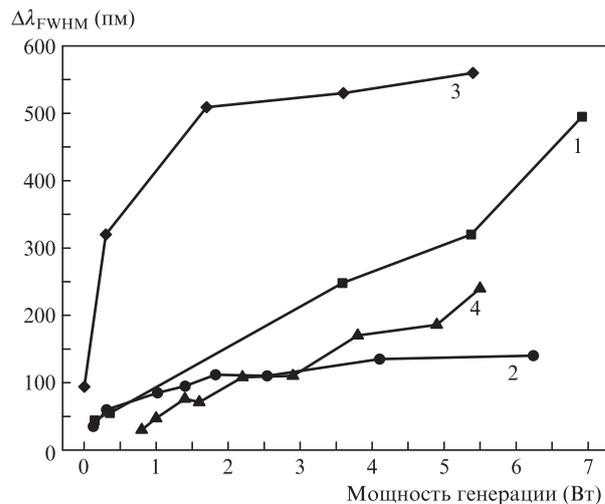


Рис.8. Зависимости ширины линии генерации ВКР-лазера от мощности стоксовой компоненты для различных конфигураций лазера: ВО ВБР1 на входе, прямой скол на выходе (1); ВО ВБР1 на входе, СО ВБР на выходе (2); ВО ВБР1, 2 на входе, прямой скол на выходе (3); ВО ВБР1, 2 на входе, СО ВБР на выходе (4).

В данной конфигурации получено значительное сужение линии генерации (рис.7,б), при этом в диапазоне выходных мощностей менее 2 Вт ширина линии не превышала 100 пм. Пороговая мощность накачки составила около 2.5 Вт, а максимальная мощность стоксовой компоненты – 5.5 Вт при мощности накачки 8.5 Вт (рис.7,а). Результаты численного моделирования с граничными условиями $R_1 = 0.9$, $R_r = 0.15$ хорошо согласуются с результатами эксперимента при $g_R = 0.85 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$.

Сравнение ширин линий генерации для разных конфигураций лазера приведено на рис.8. В конфигурации с одной ВО ВБР на входе и прямым сколом на выходе линия генерации равномерно уширяется от 50 пм при мощности генерации 100 мВт до 500 пм при выходной мощности 7 Вт. При использовании СО ВБР вместо прямого скола получено минимальное уширение линии генерации (140 пм) при максимальной выходной мощности 6.2 Вт. В конфигурации с двумя входными ВО ВБР и прямым сколом на выходе наблюдается наиболее сильное уширение линии генерации: общая ширина линии резко возрастает при малых мощностях и превышает 500 пм уже при выходной мощности 1.5 Вт. В конфигурации с двумя ВО ВБР на входе и СО ВБР на выходе получена наиболее узкая линия при малых выходных мощностях (менее 50 пм при выходной мощности ~ 1 Вт).

Максимальная выходная мощность генерации достигнута в конфигурации с одной ВО ВБР и прямым сколом на выходе (7 Вт при мощности накачки 11.7 Вт), а наиболее эффективное преобразование излучения накачки в стоксово излучение (около 65%) получено в схеме с двумя ВО ВБР на входе и СО ВБР на выходе (5.5 Вт на выходе при мощности накачки 8.5 Вт).

Полученный режим генерации излучения является непрерывным. Поскольку излучение накачки было линейно поляризованным и в эксперименте использовались волокно и компоненты с сохранением поляризации, стоксово излучение также было линейно поляризованным. Коэффициент экстинкции, измеренный с помощью поляриметра Thorlabs PRX 5004 в конфигурации с двумя входными ВО ВБР и прямым сколом на выходе, составил примерно -20 дБ.

3. Заключение

В работе исследованы характеристики ВКР-лазеров на основе ДСС, в которых в качестве зеркал резонатора использовались ВБР, записанные фемтосекундным излучением. Для схемы с одной ВО ВБР на входе проведена оптимизация по коэффициенту отражения выходной СО ВБР, в результате которой получено значительное сужение линии генерации по сравнению с конфигурацией с входной ВО ВБР и прямым сколом волокна на выходе при близких значениях максимальной выходной мощности. В данной конфигурации ширина линии слабо зависит от мощности и не превышает 140 нм, что примерно в четыре раза меньше ширины линии генерации лазера со СРОС в конфигурации с кольцевым зеркалом (550 пм) при сравнимой выходной мощности ~ 7 Вт и на порядок меньше ширины линии, полученной в классической конфигурации с кольцевым зеркалом на входе и прямым сколом на выходе (3 нм при мощности 5.9 Вт), реализованной авторами работы [5]. Параметры такой узкополосной генерации примерно соответствуют лучшим результатам, полученным для короткого ВКР-лазера на основе СП одномодового световода со специальными узкополосными ВБР [8].

Наибольшая оптическая эффективность (65%) преобразования накачки в стоксово излучение достигнута для схемы с двумя ВО ВБР на входе и СО ВБР на выходе; это чуть выше эффективности обычных волоконных ВКР-лазеров с узкополосными ВБР [8].

Применение многосердцевинных волокон для создания волоконных ВКР-лазеров позволяет уменьшить влияние нелинейных эффектов, что приводит к значительно меньшему уширению спектра генерации при одной и той же выходной мощности. Применение поточечной записи ВБР позволяет избежать нерезонансных потерь для вводимого в резонатор излучения накачки и формировать структуры, обеспечивающие возможность дополнительной селекции.

Авторы выражают благодарность ЦКП «Спектроскопия и оптика» за предоставленное оборудование и А.А.Власову за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 14-22-00118).

1. Wrage M., Glas P., Fischer D., Leitner M., Vysotsky D.V., Napartovich A.P. *Opt. Lett.*, **25**, 1436 (2000).
2. Kurkov A.S., Paramonov V.M., Dianov E.M., Isaev V.A., Ivanov G.A. *Laser Phys. Lett.*, **3**, 441 (2006).
3. Kurkov A.S., Babin S.A., Lobach I. A., Kablukov S.I. *Opt. Lett.*, **33**, 61 (2008).
4. Bouillet J., Sabourdy D., Desfarges-Berthelemort A., Kermène V., Pagnoux D., Roy P., Dussardier B., Blanc W. *Opt. Lett.*, **30**, 1962 (2005).
5. Budarnykh A.E., Lobach I.A., Zlobina E.A., Velmskin V.V., Kablukov S.I., Semjonov S.L., Babin S.A. *Opt. Lett.*, **43**, 567 (2018).
6. Dostovalov A.V., Wolf A.A., Parygin A.V., Zyubin V.E., Babin S.A. *Opt. Express*, **24**, 16232 (2016).
7. Vatnik I.D., Churkin D.V., Babin S.A. *Opt. Express*, **20**, 28033 (2012).
8. Surin A.A., Borisenko T.E., Larin S.V. *Opt. Lett.*, **41**, 2644 (2016).