

Исследование пространственных характеристик выходного пучка каскадного ВКР-лазера с многомодовой диодной накачкой

А.Г.Кузнецов, С.И.Каблуков, Е.В.Подивилов, С.А.Бабин

Исследованы пространственные характеристики выходного пучка каскадного ВКР-лазера с многомодовой накачкой. Измерены профили интенсивности пучков проходящего излучения накачки, а также 1-го и 2-го стоксовых порядков ВКР-генерации в двух различных конфигурациях лазеров: в классическом лазере с двумя парами отражателей и в схеме с полукрытым резонатором для 2-го стоксова порядка. Показано, что динамика изменений профилей интенсивности пучков излучения в двух рассматриваемых резонаторах существенно различается. Полученные данные для профилей пучков анализируются совместно с мощностными характеристиками каскадного ВКР-лазера в рамках балансной модели взаимодействия излучения накачки и стоксовых компонент ВКР.

Ключевые слова: ВКР-генерация, многомодовый градиентный световод, волоконные брэгговские решетки, балансная модель.

1. Введение

В последнее время большое внимание привлекают ВКР-лазеры на основе градиентных волоконных световодов (ГВС, или GIF – graded-index fiber) из-за возможности эффективного преобразования многомодового ($M^2 \approx 30$) излучения мощных лазерных диодов (ЛД) в стоксов пучок с хорошим качеством ($M^2 \approx 2-3$) в полностью волоконной схеме резонатора с волоконными брэгговскими решетками (ВБР) и волоконными объединителями излучения накачки от нескольких ЛД [1, 2]. Такие ВКР-лазеры при использовании коммерчески доступных ГВС и ЛД с длиной волны излучения 915–960 нм могут генерировать стоксово излучение в диапазоне длин волн менее 1 мкм, где эффективная и стабильная генерация волоконных лазеров на основе одномодовых световодов, легированных Yb, затруднительна из-за фотопотемнения световода и других мешающих эффектов [3]. Подключение нескольких (до трех) мощных ЛД к ГВС с сердцевиной диаметром 100 мкм с помощью объединителя многомодовой накачки позволяет увеличивать суммарную мощность накачки на входе в световод до ~ 200 Вт и получать генерацию стоксова излучения мощностью 50–60 Вт на длинах волн 954 нм [1] и 976 нм [4] при использовании ЛД с центральными длинами волн 915 и 940 нм соответственно. Примечательно, что генерируемое стоксово излучение 1-го порядка ВКР имеет лучшее качество пучка ($M^2 \approx 2$) по сравнению с качеством пучка накачки от мощных многомодовых ЛД ($M^2 \approx 30$).

А.Г.Кузнецов, С.И.Каблуков. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: leks.kuznecov@gmail.com

Е.В.Подивилов, 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

Поступила в редакцию 26 октября 2021 г.

Применение каскадных многомодовых ВКР-лазеров с генерацией стоксовых компонент более высокого порядка [5] дает возможность еще улучшить качество пучка, в частности в [6] качество пучка генерируемого стоксова излучения 2-го порядка ВКР ($\lambda = 1019$ нм) достигало ~ 1.35 , что близко к дифракционному пределу. Несмотря на то что эффект «ВКР-чистки» пучка в волокнах с градиентным профилем показателя преломления хорошо известен [7], приведенное в литературе его объяснение является качественным и основано на сложном анализе интегралов перекрытия различных поперечных мод пучков накачки и стоксова излучения [8]. Для построения более полной модели взаимодействия волн накачки и ВКР требуется проведение измерений выходных параметров пучков непосредственно в плоскости выходного торца лазера. В работе [9] были впервые зарегистрированы профили интенсивности разных спектральных компонент выходного излучения однокаскадного ВКР-лазера, при этом оптическая схема измерения обеспечивала получение изображения торца выходного волокна. Таким образом, были получены профили интенсивности волн накачки и стоксова излучения 1-го порядка ВКР и был обнаружен эффект «выжигания дыры» в пучке накачки. Данный эффект был качественно объяснен в рамках предложенной балансной модели, в которой предполагается локальное взаимодействие волны накачки и стоксовой волны. Поскольку поперечный размер пучка стоксова излучения намного меньше, чем у пучка накачки (за счет малого поперечного размера выходной ВБР, формирующей резонатор), при эффективном ВКР-преобразовании происходит выжигание дыры в центральной области пучка накачки. Однако балансная модель не объясняет количественно наблюдаемое в эксперименте значительное увеличение интенсивности стоксовой волны по сравнению с интенсивностью излучения накачки.

Настоящая статья является продолжением работ по исследованию процессов взаимодействия волн накачки и ВКР, однако в отличие от предыдущих работ рассматривается каскадная схема ВКР-лазера с последовательной

генерацией 1-й и 2-й стоксовых компонент (лазер с двумя парами ВБР и лазер с полуоткрытым вторым резонатором, т. е. с одной ВБР и рэлеевской обратной связью для 2-й стоксовой компоненты). Были измерены выходные профили интенсивности излучения накачки, а также излучений 1-го и 2-го стоксовых порядков ВКР. Проведено сравнение изменений профилей интенсивности и выходной мощности разных компонент для двух типов резонатора, которое показывает их существенное различие.

2. Эксперимент

Схема волоконного ВКР-лазера представлена на рис.1. Первый каскад лазера формировался плотной ВБР, записанной интерферометрическим методом [10] излучением УФ лазера, с коэффициентом отражения $R \approx 90\%$ на брэгговской длине волны 976 нм и выходной слабоотражающей ВБР, изготовленной методом поточечной записи фемтосекундными импульсами [11], с $R \approx 4\%$ на $\lambda = 976$ нм. Второй каскад формировался плотной ВБР, отражающей на $\lambda = 1019$ нм (2-я стоксова компонента ВКР), и случайным рэлеевским рассеянием назад с другой стороны резонатора, т. е. использовалась так называемая полуоткрытая схема резонатора лазера со случайной обратной связью (random Raman fiber laser – RRFL). Также исследовался классический двухкаскадный ВКР-лазер (RFL), который был сформирован из первой схемы добавлением слабоотражающей выходной ВБР для 2-й стоксовой компоненты ($R \approx 4\%$, $\lambda = 1019$ нм).

Для накачки применялись три мощных (более 100 Вт) многомодовых ЛД с волоконными выходами (волокно со ступенчатым профилем показателя преломления, 105/125 мкм, NA = 0.22) и длиной волны генерации ~ 938 нм, которые были подключены к соответствующим входам объединителя накачки 3×1 . Выход объединителя приваривался к волоконно-оптической линии длиной ~ 1 км с градиентным профилем показателя преломления сердцевинки (ГВС, 100/140 мкм) и числовой апертурой 0.29. Торцы выходного волокна лазера были сколоты под углом $10^\circ - 15^\circ$, чтобы исключить влияние френелевского отражения. Выходящий из волокна пучок коллимировался линзой Л1. Фокусирующая линза Л2 является частью измерителя качества пучка (Thorlabs M²-MS), формирующей перетяжку внутри прибора. Для получения профиля интенсивности в плоскости торца волокна CCD-матрица измерителя пучка устанавливалась в фокусе линзы Л2, а положение выходного торца лазера юстировалось вдоль главной оптической оси колли-

мирующей линзы Л1, чтобы добиться максимальной глубины провала в профиле распределения интенсивности излучения накачки, возникающего в момент начала генерации стоксового излучения.

Для измерения поперечных профилей распределения интенсивности пучков излучений 1-го и 2-го стоксовых порядков и проходящего излучения накачки в схеме на рис.1 использовались три различных интерференционных фильтра ИФ с центральными длинами волн пропускания 1025 нм ($\Delta\lambda = 50$ нм), 976 нм ($\Delta\lambda = 25$ нм) и 950 нм ($\Delta\lambda = 25$ нм). Таким образом, выделялась интересующая нас спектральная компонента. Отметим, что в работе [9] также рассматривалась возможность регистрации профиля распределения интенсивности на выходе оптоволоконна в подобной схеме и сообщалось об ухудшении контраста измеряемого профиля при продольном отклонении выходного волокна от оптимального положения. Для качественной оценки влияния высших поперечных мод на формируемый поперечный профиль распределения интенсивности в схеме устанавливалась диафрагма Д с варьируемым диаметром.

3. Результаты эксперимента

На рис.2 приведены измеренные мощности проходящего излучения накачки, а также излучений 1-го и 2-го стоксовых порядков ВКР для двух конфигураций лазеров: RFL и RRFL. При мощности накачки на входе до 100 Вт мощность проходящего излучения накачки растет линейно с ростом мощности накачки на входе и наклон

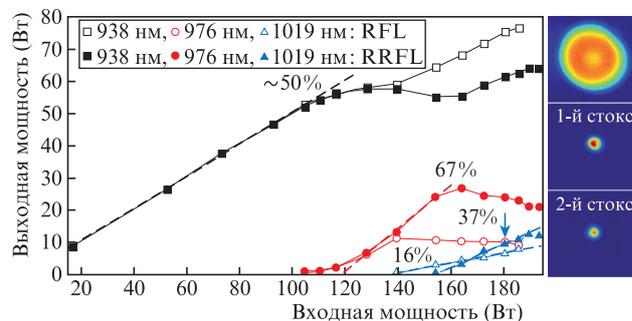


Рис.2. Измеренные мощности проходящего излучения накачки ($\lambda = 938$ нм), 1-го ($\lambda = 976$ нм) и 2-го ($\lambda = 1019$ нм) стоксовых порядков ВКР в зависимости от мощности входной накачки, а также соответствующие им типичные профили интенсивности пучков излучения при мощности накачки выше порога генерации 2-го стоксового порядка ВКР (RRFL). Стрелкой указан порог генерации 3-го стоксового порядка ВКР.

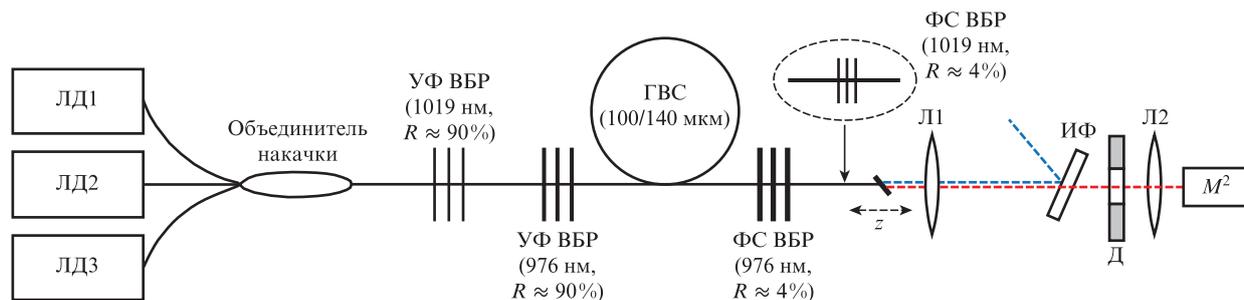


Рис.1. Схема многомодового волоконного ВКР-лазера:

ЛД1–ЛД3 – многомодовые ЛД; УФ ВБР – плотная ВБР, записанная УФ излучением; ФС ВБР – слабоотражающая ВБР, записанная поточечным методом фемтосекундными импульсами; Л1, Л2 – линзы; ИФ – интерференционный фильтр; Д – диафрагма.

этой зависимости определяется потерями в волоконной линии (~3 дБ). При мощности накачки на входе ~110 Вт начинается генерация излучения 1-го стоксова порядка ВКР ($\lambda = 976$ нм), которое истощает накачку, изменяя, соответственно, наклон зависимости мощности проходящего излучения накачки от ее мощности на входе. Важное различие двух схем резонаторов для 2-й стоксовой компоненты (RFL и RRFL) заключается в том, что в RRFL

наблюдается спад мощности проходящего излучения накачки вследствие его истощения при ВКР-преобразовании в стоксово излучение 1-го порядка вплоть до начала генерации 2-го стоксова порядка ВКР. В то же время в RFL порог 2-го стоксова порядка ВКР ниже и стоксово излучение 1-го порядка начинает истощаться раньше, что приводит, в свою очередь, к почти линейной зависимости мощности проходящего излучения накачки от ее мощно-

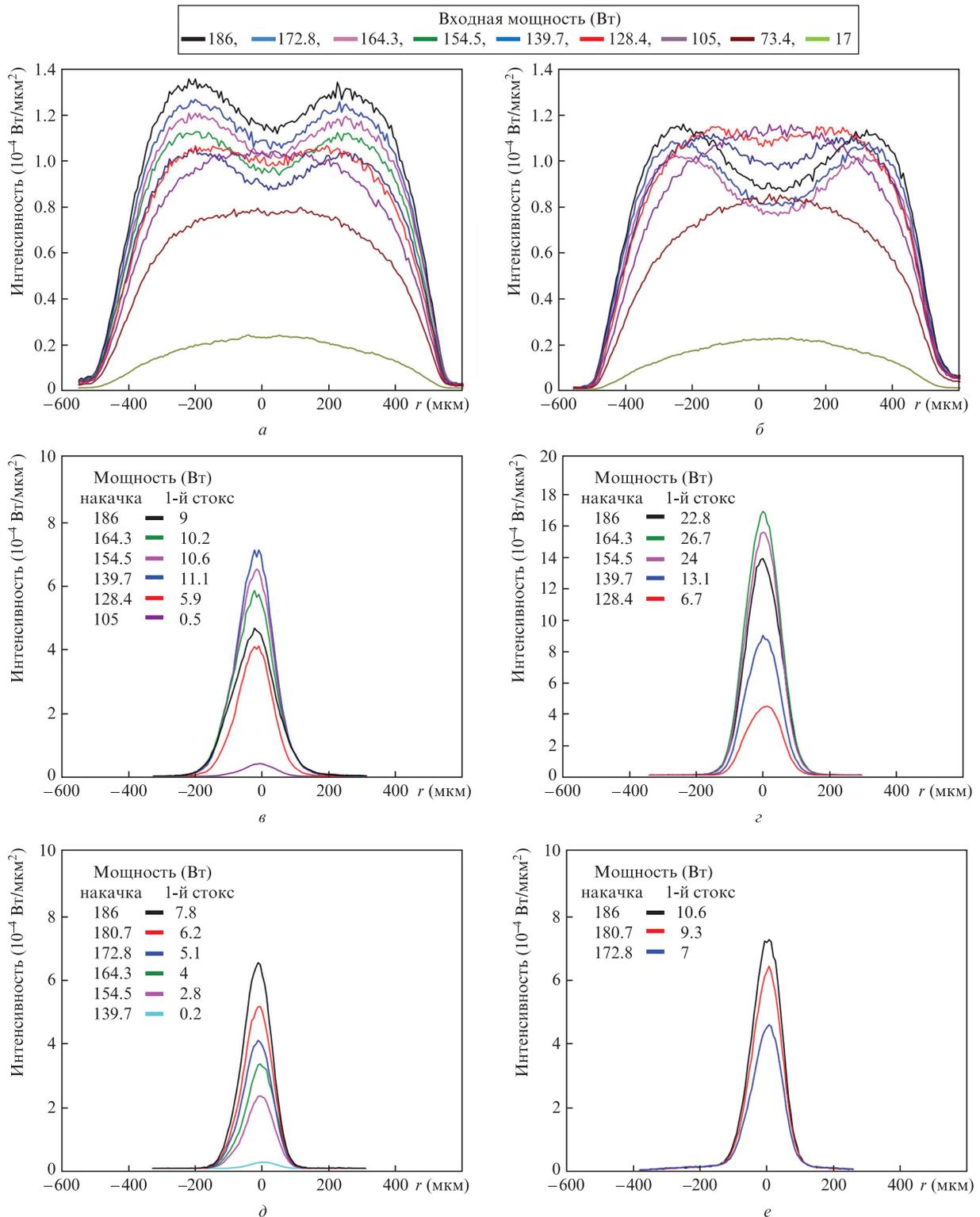


Рис.3. Поперечные профили распределений интенсивности проходящего излучения накачки (a), 1-го (б, з, е) и 2-го (д) стоксовых порядков ВКР в схеме RFL, а также аналогичные профили (б, з, е) в схеме RRFL при различных мощностях накачки на входе.

сти на входе с изломом (изменением наклона кривой) в области мощностей накачки на входе 100–140 Вт. Параметр качества пучка M^2 накачки от трех ЛД на входе лазера (после объединителя накачки) составлял ~ 27 . Генерируемый пучок излучения 1-го стоксова порядка из-за эффекта ВКР-чистки и селективных свойств ВБР имеет параметр качества 1.7–1.8, а качество пучка 2-го стоксова порядка еще больше улучшается вплоть до 1.3–1.4 для обеих конфигураций резонатора [5]. Изображения всех трех выходящих из лазера пучков при одновременной генерации 1-го и 2-го стоксовых порядков приведены на рис.2 справа, где виден образующийся провал в центре пучка накачки.

На рис.3 приведены поперечные профили распределения интенсивности проходящего излучения накачки, нормированные на показания измерителя мощности, а также 1-го и 2-го стоксовых порядков ВКР в зависимости от мощности накачки на входе для схем RFL и RRFL. До порога ВКР-генерации профиль пучка накачки близок к параболическому (в соответствии с профилем показателя преломления ГВС), при генерации стоксовой волны 1-го порядка в профиле накачки выжигается провал, ширина которого существенно больше ширины профиля стоксова пучка, а при генерации 2-й стоксовой компоненты амплитуда проходящей волны в случае RFL снова начинает расти практически без изменения формы профиля. Несколько иная ситуация наблюдается в RRFL, где величина выжигаемого провала в профиле накачки при генерации 1-й стоксовой компоненты существенно больше в соответствии с ее большей мощностью: рост амплитуды профиля интенсивности накачки начинается с возникновением генерации 2-й стоксовой компоненты, как и в предыдущем случае, но сам этот рост небольшой. Отметим также, что пучки излучения 1-го стоксова порядка в обеих конфигурациях практически не искажаются при возникновении генерации 2-го стоксова порядка и остаются близкими по форме к описываемой гауссовой функции распределения интенсивности.

Для качественной оценки вклада высших поперечных мод в величину провала в поперечном профиле распределения интенсивности излучения накачки перед измерителем качества пучка ставилась диафрагма (Д, рис.1), кото-

рая могла находиться в двух положениях: полностью открытым и перекрывающем половину пучка накачки. До порога ВКР-генерации качество M^2 пучка излучения накачки после прохождения через ГВС длиной 1 км составляет ~ 27 (рис.4,а), при этом после перекрытия половины пучка диафрагмой оно становится равным ~ 14.5 (рис.4,б). Таким образом, диафрагма является селектором, блокирующим поперечные моды высокого порядка, модовые пятна которых имеют больший диаметр по сравнению с модами более низкого порядка. На рис.5 приведены профили интенсивности проходящего излучения накачки лазера (в конфигурации RFL) в случае генерации 1-й стоксовой компоненты при открытой и полукрытой диафрагме. Видно, что при полукрытой диафрагме величина провала существенно увеличивается. Это говорит о том, что в центральной области пучка содержится часть энергии гаусс-лагерровых мод, которые нивелируют величину провала, что очевидно не учитывается в балансной модели [9] и частично объясняет существенное расхождение результатов измерений с результатом моделирования.

4. Обсуждение результатов и выводы

Таким образом, проведенные измерения показали, что до порога возникновения ВКР-генерации поперечный профиль распределения интенсивности проходящего излучения накачки ($M^2 \approx 27$) близок к параболическому. Это соответствует равномерному распределению поперечных мод, достигаемому вследствие их возможного перемешивания при распространении в градиентном световоде длиной 1 км, намотанном на катушку. При генерации интенсивной стоксовой волны с параметром качества $M^2 \approx 1.8$ наблюдается выжигание пространственной дыры в поперечном профиле распределения интенсивности проходящего излучения накачки, причем величина провала существенно увеличивается с ростом мощности стоксова излучения до порога генерации 2-й стоксовой компоненты ВКР в схеме RRFL, а с возникновением генерации этой компоненты начинает увеличиваться амплитуда всего профиля интенсивности излучения накачки как целого (без изменения формы). В то же время в схеме RFL

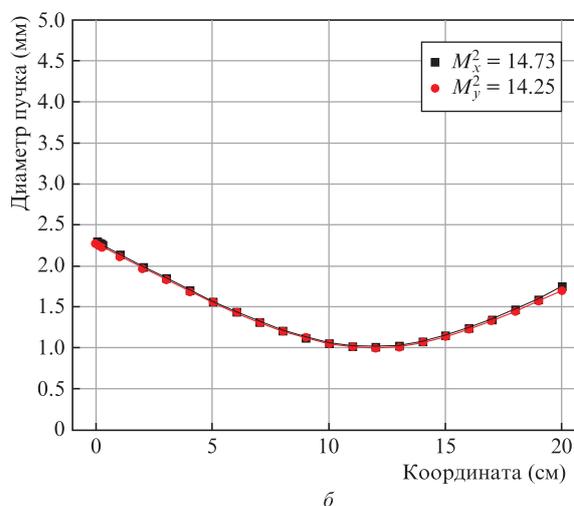
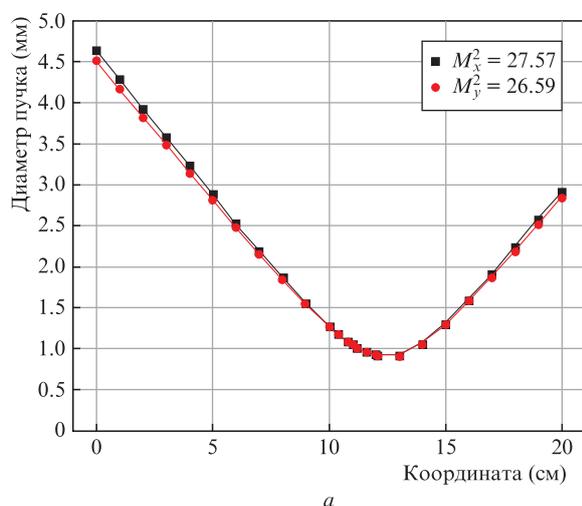


Рис.4. Результаты измерения качества пучка проходящего излучения накачки до порога ВКР-генерации при открытой (а) и полукрытой (б) диафрагме.

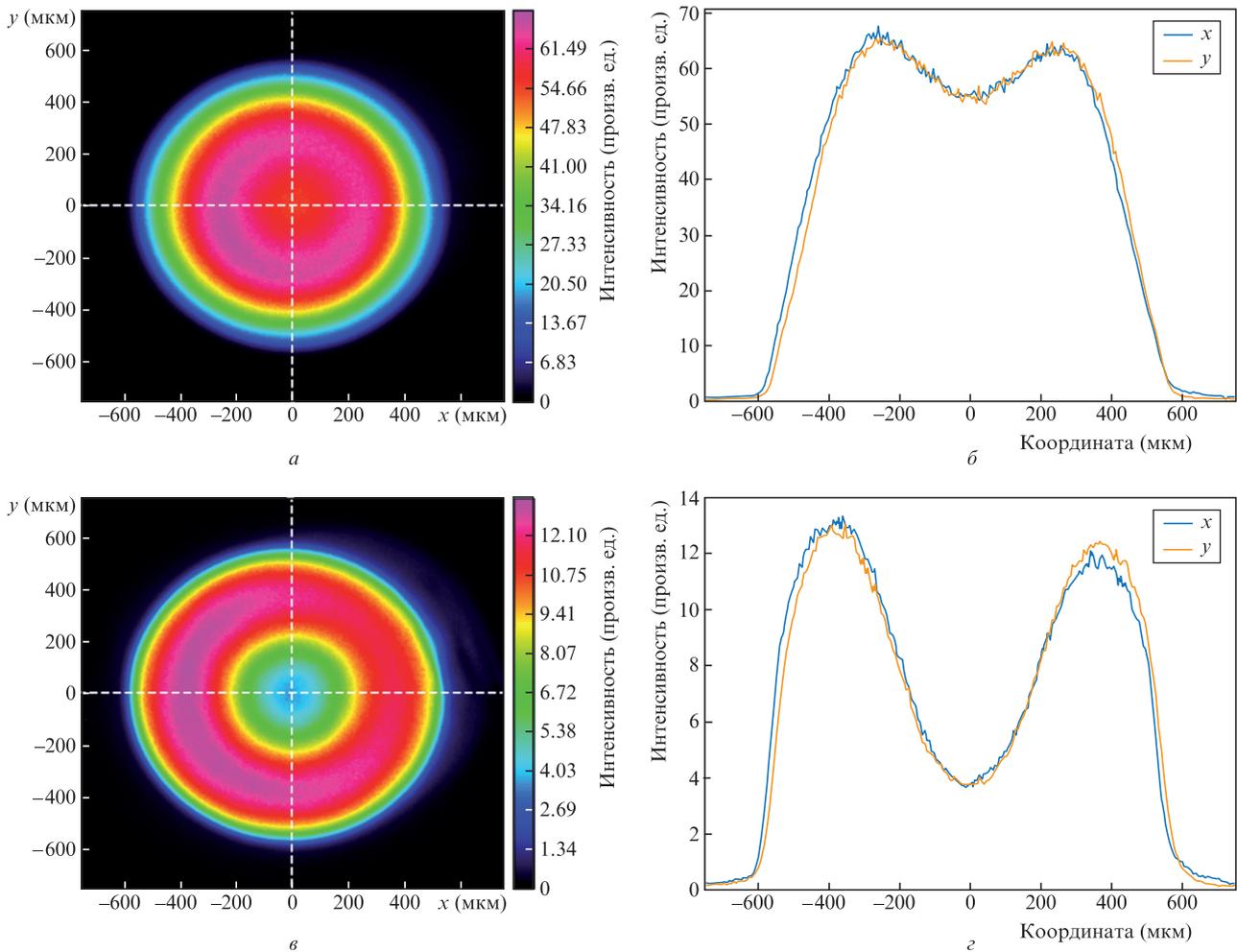


Рис.5. Профили интенсивности пучка проходящего излучения накачки в случае накачки выше порога генерации 1-й стоксовой компоненты ВКР при открытой ($a, б$) и полукрытой ($в, z$) диафрагме.

процесс формирования провала достаточно быстро сменяется увеличением амплитуды всего профиля интенсивности накачки как целого, поскольку порог генерации 2-й стоксовой компоненты ВКР здесь существенно ниже и мощность 1-й стоксовой компоненты не успевает значительно возрасти.

В отличие от поперечного профиля распределения интенсивности проходящего излучения накачки профиль интенсивности 1-й стоксовой компоненты ВКР не изменяет своей формы при истощении компонентами высших порядков ВКР и остается близким к гауссову. Ширина провала в поперечном профиле распределения интенсивности проходящего излучения накачки, как и в работе [9], заметно больше, чем для генерируемых пучков ВКР, что связано с влиянием перемешивания поперечных мод при распространении волны накачки по волокну. В то же время стоксовы пучки ВКР «не расплываются» по поперечным высшим модам, предположительно за счет эффекта керровской самоочистки пучка [12]. Поскольку модовые составы 1-й и 2-й стоксовых компонент ВКР в волокне оказываются близкими и описываются гауссовыми распределениями (близкими к одномодовому), то не наблюдается также и искажения профилей интенсивности при их взаимодействии. Качественно выжигание дыры в пучке накачки по-прежнему описывается балансной моделью [9] с той лишь разницей, что в этом процессе участвуют

уже три волны (волна накачки, 1-я и 2-я стоксовы компоненты ВКР) и процесс истощения накачки ограничивается моментом генерации 2-й стоксовой компоненты.

Поскольку 1-я и 2-я стоксовы компоненты близки к одномодовым, для описания эволюции их мощностей можно применять балансную модель одномодовых волоконных ВКР-лазеров, которая хорошо работает как в случае схемы RFL (линейные резонаторы из пар ВБР для 1-й и 2-й компонент ВКР) [13], так и в случае полукрытого резонатора с рэлеевской распределенной обратной связью [14]. Для одномодового RFL [13] при достижении порога генерации 2-й стоксовой компоненты мощность генерации 1-й стоксовой компоненты насыщается, а мощность проходящего излучения накачки растет, чтобы компенсировать потери мощности 1-й стоксовой компоненты на преобразование во 2-ю компоненту, что мы и видим в нашем случае для схемы RFL (рис.2). Для одномодового RRFL [14] с ростом мощности 2-й стоксовой компоненты 1-я стоксова компонента на выходе должна истощаться почти до нуля, однако это истощение ограничено ранним достижением порога генерации 3-й стоксовой компоненты, что, по-видимому, связано с инъекцией излучения на $\lambda = 1065$ нм от ЛД [6]. Если такая инъекция отсутствовала (в частности для многомодового ВКР-лазера с диодной накачкой на $\lambda = 915$ нм [5]) и порог генерации 3-й стоксовой компоненты не достигался, мощность 1-й сток-

совой компоненты на выходе снижалась почти до нуля, когда мощность 2-й стоксовой компоненты становилась максимальной (27 Вт) [5].

Разработанные источники могут использоваться для биомедицинской диагностики в диапазоне длин волн менее 1 мкм, удвоения и учетверения частоты, для микрообработки материалов, в лазерных дисплеях и т. д.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №21-72-30024.

1. Babin S.A., Zlobina E.A., Kablukov S.I. *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **24** (3), 1400310 (2018).
2. Glick Y., Shamir Y., Sintov Y., Goldring S., Pearl S. *Opt. Fiber Technol.*, **52**, 101955 (2019).
3. Richardson D.J., Nilsson J., Clarkson W.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **27** (11), B63 (2010).
4. Kuznetsov A.G., Kablukov S.I., Wolf A.A., Nемов I.N., Tyrtshnyy V.A., Myasnikov D.V., Babin S.A. *Laser Phys. Lett.*, **16** (10), 105102 (2019).
5. Evmenova E.A. et al. *Sci. Rep.*, **8** (1), 17495 (2018).
6. Kuznetsov A.G., Nемов I.N., Wolf A.A., Kablukov S.I., Babin S.A. *Opt. Express*, **29** (11), 17573 (2021).
7. Baek S.H., Roh W. *Opt. Lett.*, **29** (2), 153 (2004).
8. Terry N.B., Alley T.G., Russell T.H. *Opt. Express*, **15** (26), 17509 (2007).
9. Кузнецов А.Г., Каблуков С.И., Подивилов Е.В., Бабин С.А. *Квантовая электроника*, **50** (12), 1091 (2020) [*Quantum Electron.*, **50** (12), 1091 (2020)].
10. Абдуллина С.Р., Власов А.А., Бабин С.А. *Квантовая электроника*, **40** (3), 259 (2010) [*Quantum Electron.*, **40** (3), 259 (2010)].
11. Вольф А.А., Достовалов А.В., Вабниц С., Бабин С.А. *Квантовая электроника*, **48** (12), 1128 (2018) [*Quantum Electron.*, **48** (12), 1128 (2018)].
12. Podivilov E.V., Kharenko D.S., Gonta V.A., Krupa K., Sidelnikov O.S., Turitsyn S., Fedoruk M.P., Babin S.A., Wabnitz S. *Phys. Rev. Lett.*, **122** (10), 103902 (2019).
13. Babin S.A., Churkin D.V., Podivilov E.V. *Opt. Commun.*, **226** (1–6), 329 (2003).
14. Babin S.A., Zlobina E.A., Kablukov S.I., Podivilov E.V. *Sci. Rep.*, **6**, 22625 (2016).