

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

PACS 42.60.By; 42.60.Jf; 42.65.Es; 42.65.Hw

Фазировка многоканального лазерного излучения при ВРМБ

В.А.Богачев, С.Г.Гаранин, Ю.В.Долгополов, А.В.Копалкин, С.М.Куликов, Ф.А.Стариков, С.А.Сухарев, В.В.Феоктистов

Исследована фазировка двух- и четырехканального импульсных лазерных пучков за счет эффекта ОВФ при нестационарном ВРМБ в двухпроходной схеме усиления. Экспериментально продемонстрировано высокое качество фазировки пучков при использовании в схеме ВРМБ-зеркала раstra микролинз и углового селектора. Результаты расчетов по программе, моделирующей процесс нестационарного ВРМБ, находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными.

Ключевые слова: фазировка лазерного излучения, обращение волнового фронта, вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна.

1. Введение

Одним из актуальных и перспективных способов повышения мощности и яркости излучения лазеров является создание многоканальных лазерных систем с взаимной фазировкой излучения в параллельных каналах [1]. В настоящей работе рассматривается фазировка многоканального импульсного лазерного пучка в двухпроходной схеме усиления с помощью обращения волнового фронта (ОВФ) при вынужденном рассеянии Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) [2], когда многоканальное излучение фокусируется в объемную кювету с ВРМБ-средой и рассеивается на общей гиперзвуковой решетке. Таким образом, фазировка сводится к ОВФ в частном случае пучка лазерной накачки с неоднородно-фрагментированной пространственной структурой, и качество фазировки должно определяться качеством ОВФ. В работе [3] рассматривалась схема фазировки соосных лазерных пучков в условиях четырехволнового смешения с несколькими ВРМБ-кюветами. В настоящей работе реализована схема фазировки за счет эффекта ОВФ при фокусировке пространственно разделенных пучков накачки в одну ВРМБ-кювету и формировании обращенной волны из спонтанного стока шума.

В случае фокусировки линзой одноканального лазерного пучка в ВРМБ-кювету качество ОВФ снижается с ростом искажений волнового фронта накачки и при слабом насыщении ВРМБ (при невысоких коэффициентах отражения ВРМБ-зеркала) [4], при влиянии самовоздействия пучка накачки [5], нестационарности процесса [6] и т. д. Можно обойти ряд проблем и получить высокое качество ОВФ, применяя систему фокусировки излучения

накачки в ВРМБ-кювету с упорядоченным растром микролинз и угловым селектором [7–10]. Целью настоящей работы является демонстрация фазировки многоканального лазерного пучка с использованием ВРМБ-зеркала с растром микролинз, причем в нестационарных условиях, когда длительность импульса накачки сравнима со временем релаксации гиперзвука.

2. Схема эксперимента

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. На выходе из задающего генератора (лазер на неодимовом стекле) 1 формируется пучок излучения (длина волны $\lambda = 1.053$ мкм, длительность импульса $\tau_p = 30$ нс, энергия $E = 30$ мДж) с практически дифракционной расходимостью $\theta = 1.3 \times 10^{-3}$ рад. Телескоп 2 увеличивает диаметр пучка, чтобы засветить маску 4, расположенную перед усилителем 5. Маска представляет собой непрозрачный экран с двумя или четырьмя отверстиями диаметром 3 мм и расстоянием между ними 4.5 мм, что позволяет формировать двух- или четырехканальный лазерный пучок. После усиления лазерного импульса до энергии $E = 150$ –300 мДж в усилителе 5 многоканальный пучок

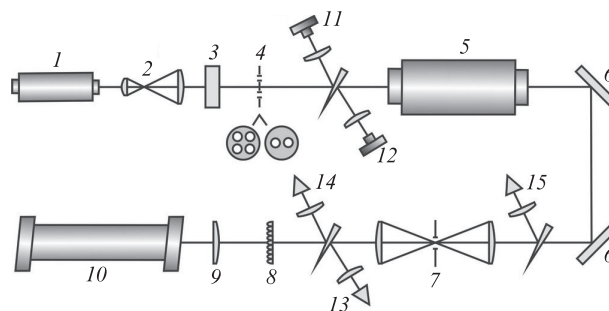


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – задающий генератор; 2 – телескоп; 3 – оптический вентиль; 4 – экран; 5 – усилитель; 6 – зеркало; 7 – угловой селектор; 8 – растр микролинз Френеля; 9 – фокусирующая линза; 10 – ВРМБ-кювета; 11, 12 – CCD-камеры; 13, 14, 15 – калириметры.

В.А.Богачев, С.Г.Гаранин, Ю.В.Долгополов, А.В.Копалкин, С.М.Куликов, Ф.А.Стариков, С.А.Сухарев, В.В.Феоктистов. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: bogachev.v@mail.ru, garanin@otd13.vniief.ru

Поступила в редакцию 7 февраля 2012 г., после доработки – 14 марта 2012 г.

направляется в ВРМБ-зеркало, которое состоит из углового селектора 7, растра микролинз Френеля 8, фокусирующей линзы 9 и ВРМБ-кюветы 10. Угловой селектор, полностью пропуская накачку, обеспечивает селекцию необращенной компоненты стока излучения. Для развязки ВРМБ-зеркала от задающего генератора используется оптический вентиль 3 – ячейка Фарадея и поляризатор.

Пространственные характеристики лазерного и усиленного стока излучений регистрируются с помощью ССД-камер 11 и 12 соответственно. О качестве ОВФ можно судить по степени сходства полученных распределений интенсивности в ближней и дальней зонах. Энергии накачки и стока излучения до и после прохождения через угловой селектор измеряются калориметрами 13, 14 и 15. По отношению показаний этих калориметров определяется коэффициент отражения R лазерного излучения от ВРМБ-зеркала и коэффициент селекции (доля энергии излучения, прошедшего через селектор) k стока излучения.

Активной ВРМБ-средой служит смесь газов SF_6 и Хе при давлении ~ 50 атм. Коэффициент усиления стока излучения в такой среде $g = 72$ см/ГВт. Время релаксации гиперзвука τ для $\lambda = 1.053$ мкм равняется ~ 36 нс, поэтому $\tau_p/\tau \sim 1$, т.е. реализуется нестационарный режим возбуждения ВРМБ. В работах [8–10] было показано, что высокое качество ОВФ при ВРМБ лазерного излучения достигается при определенной конфигурации ВРМБ-зеркала с растром идентичных микролинз [7]. Если при фокусировке линзой близкий к идеалу коэффициент обращения можно получить только при глубоком насыщении ВРМБ, когда коэффициент отражения превышает 80%–90%, то в ВРМБ-зеркале с растром микролинз высокое качество ОВФ достигается при любой мощности, начиная с пороговой. В экспериментах использовался растр восьмиуровневых микролинз Френеля с фокусным расстоянием $f = 5$ см и диаметром микролинзы $d = 0.5$ мм. Схема фокусировки лазерного излучения в ВРМБ-кювету показана на рис.2. Растр размещается таким образом [8–10], чтобы в ВРМБ-кювете при определенной геометрии и в определенной последовательности располагались обе характерные области повышенной интенсивности лазерного излучения, имеющие наибольшее влияние на динамику процесса ВРМБ: фокальная плоскость фокусирующей линзы (зона I) и плоскость изображения фокусов отдельных микролинз растра (зона II). В такой схеме фокусировки пороговая энергия возбуждения ВРМБ составляет ~ 100 мДж.

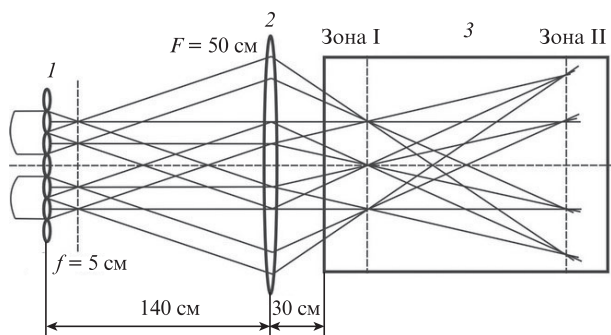


Рис.2. Схема фокусировки лазерного излучения в ВРМБ-кювету: 1 – растр; 2 – фокусирующая линза; 3 – ВРМБ-кювета.

3. Фазовое сложение лазерного излучения

Рассмотрим результаты эксперимента по фазировке двухканального лазерного пучка. Сначала была проведена оценка искажений, вносимых в волновой фронт пучка задающего генератора при распространении излучения и его усилении на прямом и обратном проходах по оптическому тракту. Для этого ВРМБ-кювета заменялась обычным плоским зеркалом. На рис.3 представлены распределения интенсивности в дальней зоне для излучения на входе в усилитель и выходного излучения (т.е. усиленного, отраженного от зеркала и вновь усиленного на обратном проходе). Видно, что усилитель и элементы оптического тракта вносят существенные искажения в волновой фронт опорного излучения. Это также подтверждается измерениями доли энергии в центральном пятне зарегистрированных распределений интенсивности. Для входного излучения она составляет 65%, а для выходного – 33%.

Чтобы скомпенсировать накапливаемые фазовые искажения, использовалось ВРМБ-зеркало. На рис.4 представлены распределения интенсивности в ближней и дальней зонах для лазерного излучения на входе в усилитель и

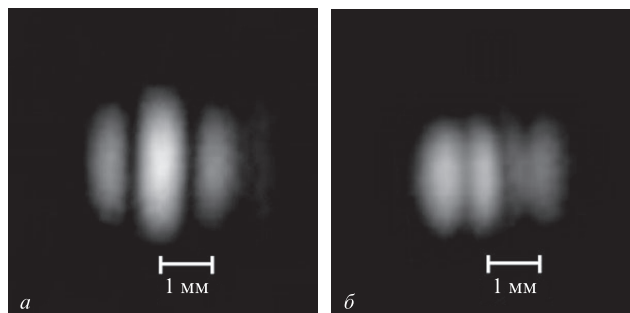


Рис.3. Распределения интенсивности в дальней зоне для излучения на входе в усилитель (а) и выходного излучения (б) в случае двухканального пучка в схеме с плоским зеркалом.

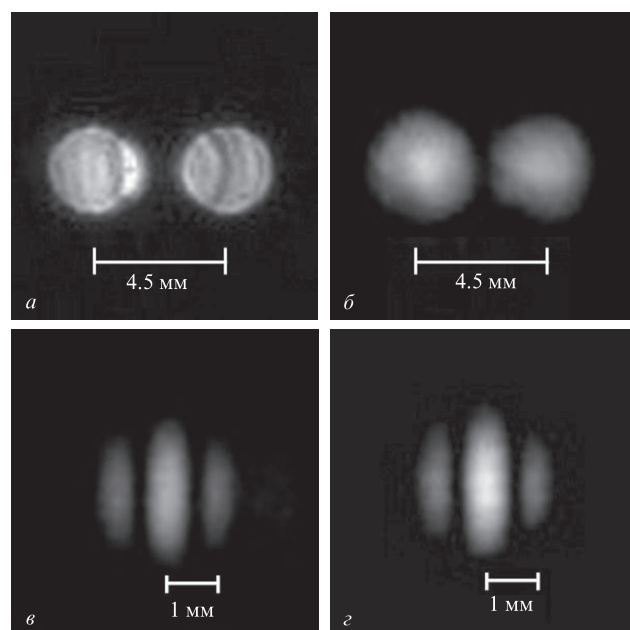


Рис.4. Распределения интенсивности в ближней (а, б) и дальней (в, г) зонах для двухканального лазерного пучка на входе в усилитель (а, в) и усиленного стока излучения (б, г) в схеме с ВРМБ-зеркалом.

выходного стоксова излучения (излучения, отраженного от ВРМБ-зеркала и усиленного на обратном проходе). Видно, что качество ОВФ довольно высокое. В ближней зоне были зарегистрированы два отдельных пучка (рис.4,б), в дальней зоне распределения интенсивности лазерного и стоксова пучков практически совпали (рис.4,з). Доля энергии в центральном пятне в дальней зоне усиленного стоксова излучения составляет 78% (напомним, что для входного излучения она равна 65%). Кроме того, измерения коэффициента селекции стоксова излучения показали, что значительная часть отраженного излучения проходит

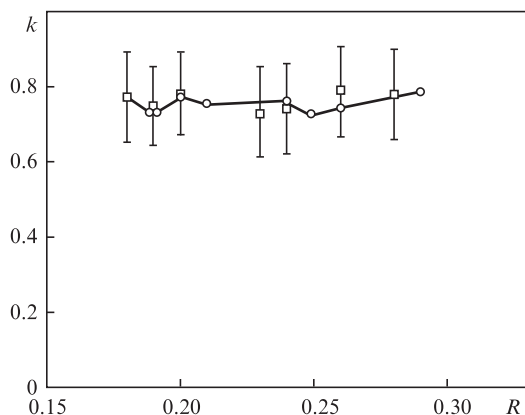


Рис.5. Расчетная (о) и экспериментальная (а) зависимости коэффициента селекции k от коэффициента отражения R лазерного излучения для двухканального лазерного пучка в схеме с ВРМБ-зеркалом.

через угловой селектор ($k = 76\% \pm 9\%$ при $R = 24\% \pm 5\%$), т. е. доля энергии необращенной стоксовой компоненты мала.

Численное моделирование фазового сложения лазерного излучения выполнялось с помощью расчетной модели и программы, описывающей процесс нестационарного ВРМБ [9]. Расчеты проводились в приближении двумерной среды, что позволяет описать основные физические эффекты, сопровождающие процесс ВРМБ (дифракция, насыщение ВРМБ, переходные процессы, связанные с затуханием гиперзвуковой волны), и в то же время резко уменьшить время расчетов. Кроме того, в расчетах не рассматривалось усиление лазерного и стоксова излучений, т. к. качество фазировки пучков в основном определяется работой ВРМБ-зеркала. В остальных параметрах расчетов соответствовали условиям проведения экспериментов.

На рис.5 представлены значения коэффициента селекции, полученные в расчетах и в эксперименте при различных коэффициентах отражения лазерного излучения. В расчетах и в эксперименте среднее значение коэффициента селекции $\langle k \rangle$ составляет $\sim 75\%$. На рис.6,а и б приведены расчетные профили интенсивности I лазерного излучения на входе в угловой селектор и стоксова излучения на выходе из селектора. Для удобства сравнения значения интенсивности лазерного и стоксова излучений нормированы на соответствующие им максимальные значения. Видно, что расчетные профили интенсивности лазерного и стоксова излучений довольно хорошо совпадают как в ближней (рис.6,а), так и в дальней (рис.6,б) зоне, т. е. каче-

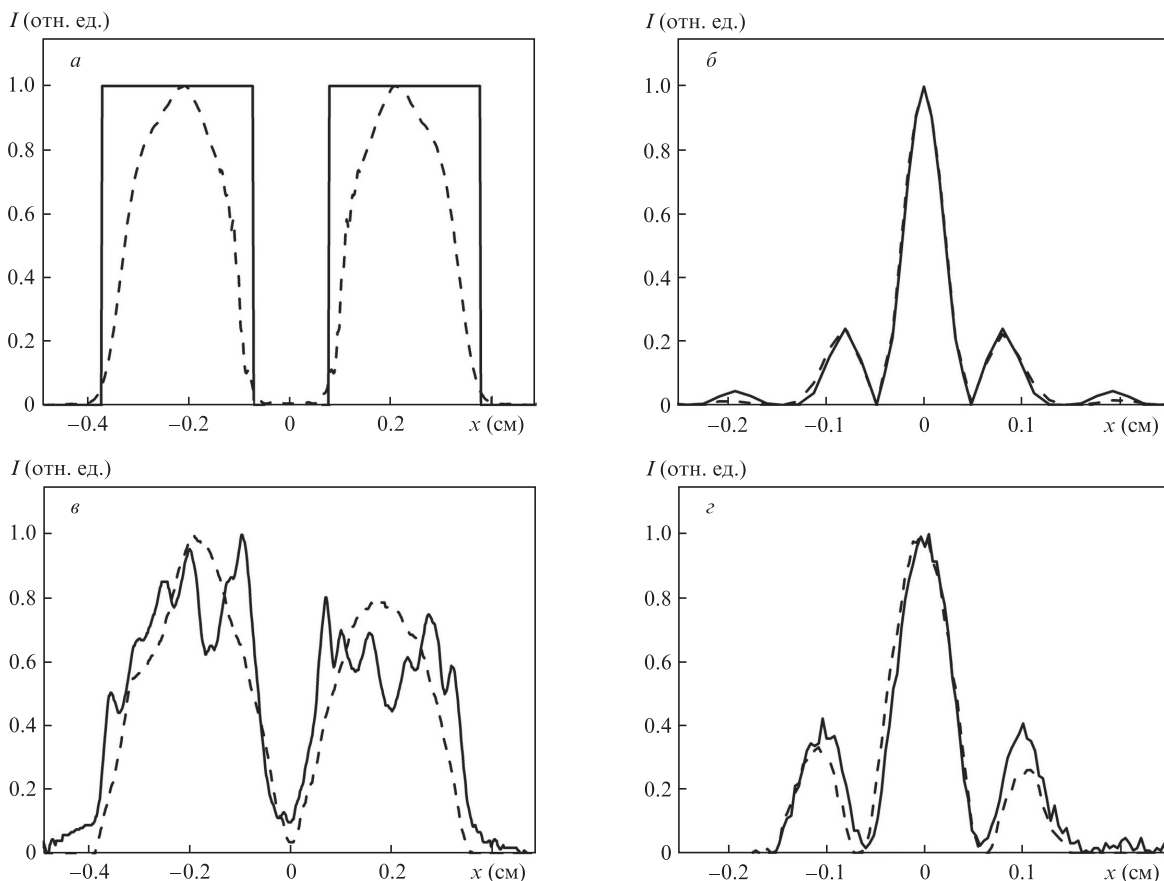


Рис.6. Расчетные (а, б) и экспериментальные (в, з) профили интенсивности лазерного (сплошные кривые) и стоксова (штриховые кривые) излучений в ближней (а, в) и дальней (б, з) зонах для двухканального лазерного пучка в схеме с ВРМБ-зеркалом.

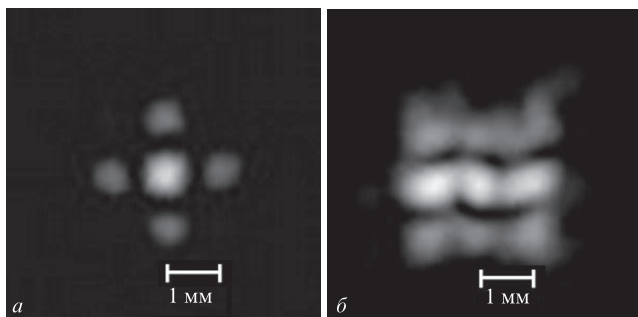


Рис.7. Распределения интенсивности в дальней зоне для излучения на входе в усилитель (*a*) и выходного излучения (*b*) в случае четырехканального пучка в схеме с плоским зеркалом.

ство ОВФ высокое. На рис.6,*b* и *z* показаны профили интенсивности усиленного стока излучения, зарегистрированные в эксперименте. Так же как и в расчетах, наблюдается хорошее согласие профилей интенсивности лазерного и стока излучений.

Таким образом, применение раstra микролинз в схеме фокусировки двухканального лазерного пучка в ВРМБ-кювету позволяет получить ОВФ высокого качества при умеренных коэффициентах отражения и осуществить фазировку двух лазерных пучков.

Рассмотрим результаты эксперимента по фазировке четырехканального лазерного пучка. На рис.7 представлены распределения интенсивности в дальней зоне для излучения на входе в усилитель и выходного усиленного излучения в схеме с обычным плоским зеркалом. Видно, что волновой фронт опорного излучения существенно искажается при его распространении и усилении на прямом и обратном проходах по оптическому тракту. Как и в случае с двухканальным пучком, доля энергии в централь-

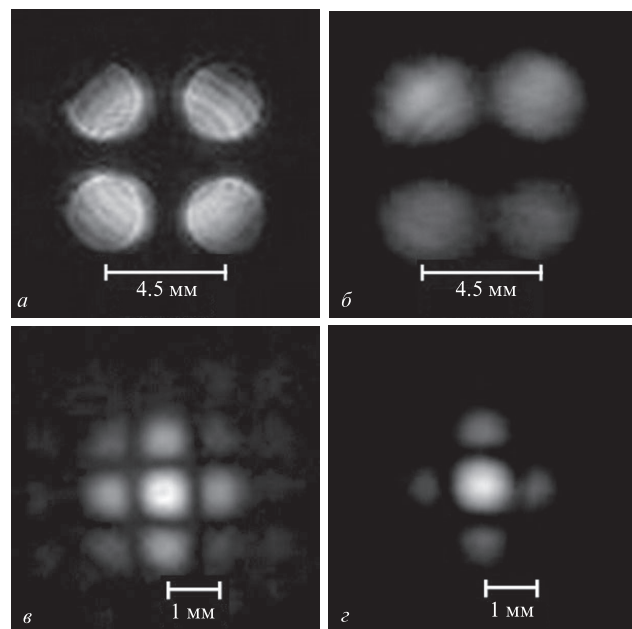


Рис.8. Распределения интенсивности в ближней (*a, b*) и дальней (*v, z*) зонах для четырехканального лазерного пучка на входе в усилитель (*a, v*) и усиленного стока излучения (*b, z*) в схеме с ВРМБ-зеркалом.

ном пятне в дальней зоне для входного излучения (55%) существенно больше, чем для выходного (14%).

На рис.8 показаны распределения интенсивности в дальней и ближней зонах лазерного излучения на входе в усилитель и усиленного стока излучения на выходе для ВРМБ-зеркала с растром микролинз. Так же как и в предыдущем случае, качество ОВФ лазерного пучка высокое. Коэффициент селекции достигает $74\% \pm 9\%$ при $R = 24\% \pm 5\%$, т.е. большая часть стока излучения проходит через селектор. Доля энергии в центральном пятне в дальней зоне для усиленного стока излучения составляет 65% (для входного излучения она равна 55%).

Таким образом, расчетные и экспериментальные данные демонстрируют возможность фазировки многоканального импульсного лазерного пучка с помощью ОВФ при ВРМБ сфокусированных пучков при зарождении обращенного стока излучения из спонтанного шума.

4. Заключение

В настоящей работе проведено исследование фазировки многоканального лазерного излучения за счет эффекта ОВФ при нестационарном ВРМБ сфокусированных пучков. Экспериментальное исследование фазировки двух- и четырехканального пучков проводилось с использованием импульсного неодимового лазера в двухпроходной схеме усиления. Сравнение распределений интенсивности многоканального лазерного и стока излучений в дальней и ближней зонах показало, что при использовании в схеме фокусировки излучения в ВРМБ-кювету микролинзового раstra и углового селектора достигается высокое качество ОВФ. В случае двухканального (четырёхканального) пучка доля энергии в центральном пятне в дальней зоне для усиленного стока излучения составляет 78% (65%), что даже выше, чем для входного лазерного излучения – 65% (55%). При этом коэффициент отражения лазерного излучения от ВРМБ-кюветы был равен 24%, а коэффициент пропускания углового селектора – 75%. С использованием двумерной расчетной модели нестационарного ВРМБ проведено численное моделирование фазировки двух каналов лазерного излучения. Полученные расчетные значения коэффициента селекции лазерного излучения и распределения интенсивности излучений в дальней зоне находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами.

1. Лиханский В.В., Напартович А.П. *УФН*, **160**, 101 (1990).
2. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. *Обращение волнового фронта* (М.: Наука, 1985).
3. Андреев Н.Ф., Палашов О.В., Пасманик Г.А., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **24**, 581 (1997).
4. Богачев В.А., Кочемасов Г.Г., Стариков Ф.А. *Квантовая электроника*, **38**, 849 (2008).
5. Кирьянов Ю.Ф., Кочемасов Г.Г., Маслов Н.В., Шестакова И.В. *Квантовая электроника*, **25**, 61 (1998); **29**, 132 (1999).
6. Богачев В.А., Маслов Н.В., Стариков Ф.А. *Квантовая электроника*, **40**, 341 (2010).
7. Грацианов К.В., Корнев А.Ф., Любимов В.В. и др. *Оптика и спектроскопия*, **68**, 617 (1990).
8. Kochemasov G.G., Starikov F.A. *Opt. Commun.*, **170**, 161 (1999).
9. Starikov F.A., Dolgoplov Yu.V., Kochemasov G.G., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3930**, 12 (2000).
10. Starikov F.A., Dolgoplov Yu.V., Kovaldov S.A., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4353**, 202 (2001).