

Обращение и преобразование волнового фронта при вынужденном рассеянии Манделъштама–Бриллюэна вихревых лазерных мод Лагерра–Гаусса

А.В.Копалкин, В.А.Богачев, Ю.В.Долгополов, Г.Г.Кочемасов, С.М.Куликов, Н.В.Маслов, Ф.А.Стариков, С.А.Сухарев, В.В.Феоктистов, В.Х.Багдасаров, Н.Н.Денисов, **А.А.Малютин**

Проведены экспериментальные исследования вынужденного рассеяния Манделъштама–Бриллюэна (ВРМБ) вихревых лазерных пучков – лагерь-гауссовых мод LG_1^1 и LG_0^1 . Экспериментально продемонстрировано преобразование волнового фронта при ВРМБ лазерной моды LG_1^1 , прямо сфокусированной в ВРМБ-кювету, при котором в стоксовом пучке селекционируется не обращенная, а основная гауссова мода LG_0^0 . Показано, что обращение волнового фронта (ОВФ) оптических вихрей достигается при разрушении структуры лазерной моды в кювете ВРМБ. Получено ОВФ мод LG_0^0 и LG_1^1 в ВРМБ-зеркале, использующем регулярный аббератор (растр микролинз) в системе фокусировки лазерного пучка в кювету ВРМБ.

Ключевые слова: оптический вихрь, вынужденное рассеяние Манделъштама–Бриллюэна, обращение волнового фронта.

1. Введение

Лазерные пучки с винтовой дислокацией волнового фронта (оптические вихри), фазовая поверхность которых представляет собой геликоид, широко изучаются в связи с их потенциальным применением в системах связи, при оптической обработке информации, в тонких технологиях [1]. В качестве хорошо известного примера оптических вихрей можно выделить лазерные моды Лагерра–Гаусса LG_n^m .

Одним из актуальных оптических преобразований лазерного пучка является обращение волнового фронта (ОВФ) [2]. ОВФ, как и любое другое управление фазой оптического вихря, трудно осуществить с помощью гибкого зеркала в устройствах линейной адаптивной оптики из-за разрывной фазовой поверхности. Поэтому представляется весьма интересным получение ОВФ на основе использования одного из известных нелинейных механизмов – вынужденного рассеяния Манделъштама–Бриллюэна (ВРМБ). Заметим, что классическое ОВФ при ВРМБ в сфокусированных пучках реализуется вследствие того, что коэффициент усиления обращенной стоксовой моды на 50% превышает коэффициент усиления ближайших стоксовых мод, обеспечивая эффективную селекцию обращенной моды [2].

Теоретический анализ и расчеты стационарного [3] и нестационарного [4] ВРМБ мод Лагерра–Гаусса, непосредственно сфокусированных в объемную ВРМБ-среду, привели к обнаружению новых явлений. Было показано,

что ОВФ вихревых мод не наблюдается из-за отсутствия селекции обращенной стоксовой моды. Это происходит вследствие того, что коэффициенты усиления ВРМБ обращенной стоксовой моды LG_n^m и аналогичной моды с обратной спиральностью LG_n^{-m} одинаковы. Поэтому (например, в случае простейшей торообразной моды LG_0^0) стоксов пучок представляет собой случайную комбинацию нескольких мод, включая обращенную. Для достаточно широкого класса вихревых пучков (например, в случае лазерной моды LG_1^1 с двумя кольцами интенсивности) наблюдается явление, которое может быть названо преобразованием волнового фронта (ПВФ) при ВРМБ. Его суть заключается в том, что в стоксовом пучке выделяется единственная мода, которая не является обращенной, как при классическом ОВФ [2], – и это основная гауссова мода. Ее коэффициент усиления на 20% превышает коэффициент усиления обращенной моды LG_1^1 и моды LG_1^{-1} , что и обеспечивает ей определенную селекцию [3, 4].

Отсутствие ОВФ моды LG_0^0 в условиях прямой фокусировки лазерного излучения в ВРМБ-среду подтверждено экспериментально [5, 6]. Целью настоящей работы является, во-первых, экспериментальная проверка предсказанного эффекта ПВФ для сфокусированной лазерной моды LG_1^1 и, во-вторых, определение условий для реализации ОВФ при ВРМБ вихревых пучков при использовании более сложного ВРМБ-зеркала, в схему фокусировки которого входит микролинзовый растр.

2. Экспериментальная установка

В оптической схеме для проведения исследований ОВФ вихревых пучков (рис.1) использовалась лазерная система, включавшая в себя лазерный излучатель и астигматический $\pi/2$ -конвертер. Лазерный излучатель был построен по схеме, аналогичной описанной в работе [7], и состоял из задающего генератора и двухпроходного усилителя. В качестве активной среды в генераторе и усилителе использовались фосфатные неодимовые стекла ГЛС-23 ($\lambda = 1.053$ мкм) с размерами $\varnothing 5 \times 100$ мм и $\varnothing 8 \times 150$ мм.

А.В.Копалкин, В.А.Богачев, Ю.В.Долгополов, Г.Г.Кочемасов, С.М.Куликов, Н.В.Маслов, Ф.А.Стариков, С.А.Сухарев, В.В.Феоктистов. Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИЭФ, Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: kopalkin@mail.ru, fstar@mail.ru

В.Х.Багдасаров, Н.Н.Денисов, А.А.Малютин. Институт общей физики им. А.Н.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 25 февраля 2011 г., после доработки – 5 сентября 2011 г.

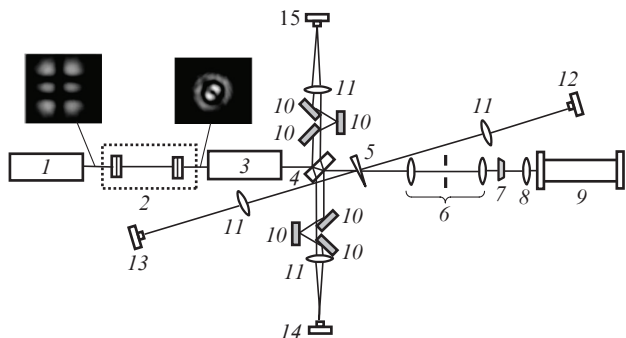


Рис.1. Оптическая схема эксперимента: 1 – задающий генератор; 2 – $\pi/2$ -конвертер; 3 – усилитель; 4 – делительная плоскопараллельная пластина; 5 – клин; 6 – угловой селектор; 7 – линзовый растр; 8 – фокусирующая линза; 9 – ВРМБ-кювета; 10 – зеркала; 11 – линзы; 12–15 – CCD-камеры.

В задающем генераторе с помощью пространственных селекторов (тонких проволок, размещаемых на оси плоскосферического резонатора) формировались эрмит-гауссовы моды HG_{01} или HG_{21} . Пассивная модуляция добротности резонатора задающего генератора осуществлялась с помощью кристалла $YAG:Cr^{4+}$. Длительность геерируемого лазерного импульса составляла 40 нс.

Лагерр-гауссовы моды LG_0^1 или LG_1^1 формировались на выходе задающего генератора с помощью перестраиваемого астигматического $\pi/2$ -конвертера, основанного на так называемом оптическом квадруполье [7].

Возбуждение ВРМБ происходило в кювете длиной 150 см, заполненной жидким фреоном C_8F_{18} (коэффициент усиления ВРМБ $g = 6.5$ см/ГВт, время затухания гиперзвука $\tau = 1$ нс [8]). Излучение лазерной моды фокусировалось в кювету ВРМБ либо одной линзой 8, либо оптической системой, состоящей из углового селектора 6, регулярного аббератора 7 в виде растра из идентичных микролинз и линзы 8.

В экспериментальных исследованиях ОВФ оптических вихрей при ВРМБ необходимо сравнивать не только распределения интенсивностей лазерной и стоксовой мод, но и распределения фаз обоих пучков. Для исследования фазовой структуры излучения применялась специальная оптическая схема интерферометра, где опорный пучок формировался из части самой моды Лагерра–Гаусса LG_0^1 или LG_1^1 (см. рис.2, являющийся фрагментом рис.1). В результате каждая из мод интерферировала с себе подобной, но имеющей топологический заряд противоположного знака (обратную спиральность), т. е. с LG_0^{-1} или LG_1^{-1} . Частота полос интерференции зависела от толщины плоскопараллельной пластины 4, и ее можно было дополнительно изменять путем наклона зеркал 10.

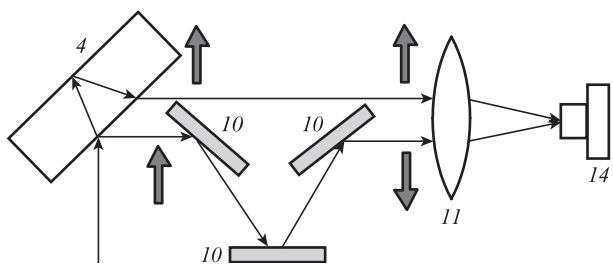


Рис.2. Оптическая схема определения фазы лазерного пучка: 4 – делительная плоскопараллельная пластина; 10 – зеркала; 11 – линза; 14 – CCD-камера.

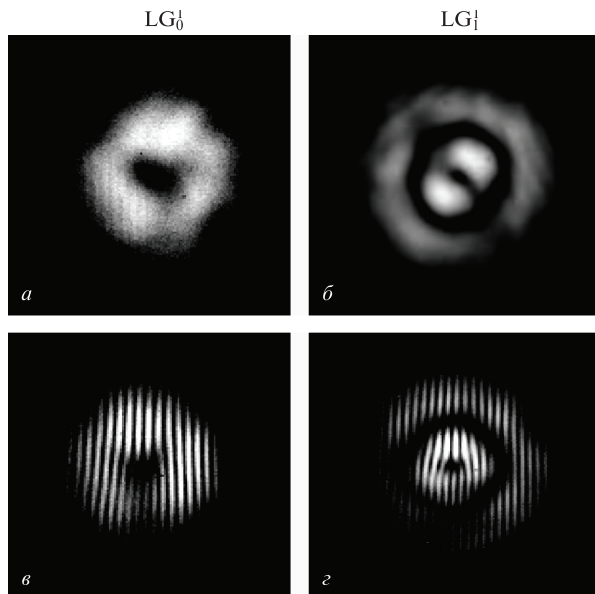


Рис.3. Экспериментальные распределения интенсивности (а, б) и фазовые портреты (в, з) мод LG_0^1 (а, в) и LG_1^1 (б, з).

На рис.3 показаны экспериментальные распределения интенсивности лазерных мод LG_0^1 и LG_1^1 в дальней зоне и картины их интерференции с наклонной волной в виде моды LG_0^{-1} и LG_1^{-1} соответственно.

Особенность интерференции мод Лагерра–Гаусса с противоположной закруткой фазовой спирали проявляется в интерферограмме в виде ветвления полосы в центре пучка с образованием характерной «вилки», причем в центре рождается дополнительная полоса по сравнению со случаем интерференции вихревой моды с плоской опорной волной [1]. Подобное ветвление полос говорит о вихревом характере исследуемого пучка, а отсутствие ветвления – о регулярности фазовой поверхности пучка.

3. ВРМБ лазерной моды LG_1^1 и преобразование ее волнового фронта

Ранее теоретически [3, 4] и экспериментально [5, 6] было показано, что в случае прямой линзовой фокусировки лазерной моды LG_0^1 стоксов пучок представляет собой случайную суперпозицию вихревых мод LG_0^1 и LG_0^{-1} , и ОВФ в таких условиях не наблюдается. Особенности процесса ВРМБ лазерной моды более высокого порядка (LG_1^1) экспериментально исследуются в настоящей работе.

В экспериментах излучение моды LG_1^1 фокусировалось в кювету ВРМБ линзой 8 с фокусным расстоянием 50 см (угловой селектор 6 и линзовый растр 7 были убраны из схемы). Длина области взаимодействия в нелинейной среде составляла несколько перетяжек лазерного пучка. В каждой лазерной вспышке проводилась регистрация интенсивности и фазового портрета лазерного и стоксова излучений четырьмя CCD-камерами (см. рис.1). Особенности ВРМБ моды LG_1^1 исследовались в двух режимах – вблизи порога возбуждения стоксова излучения и в режиме насыщения ВРМБ.

В околопороговом режиме ВРМБ (коэффициент отражения стоксова излучения на уровне 1%–5%) в большинстве лазерных вспышек наблюдается режим, который действительно может быть назван преобразованием волнового фронта при ВРМБ [3, 4]. Его суть заключается в

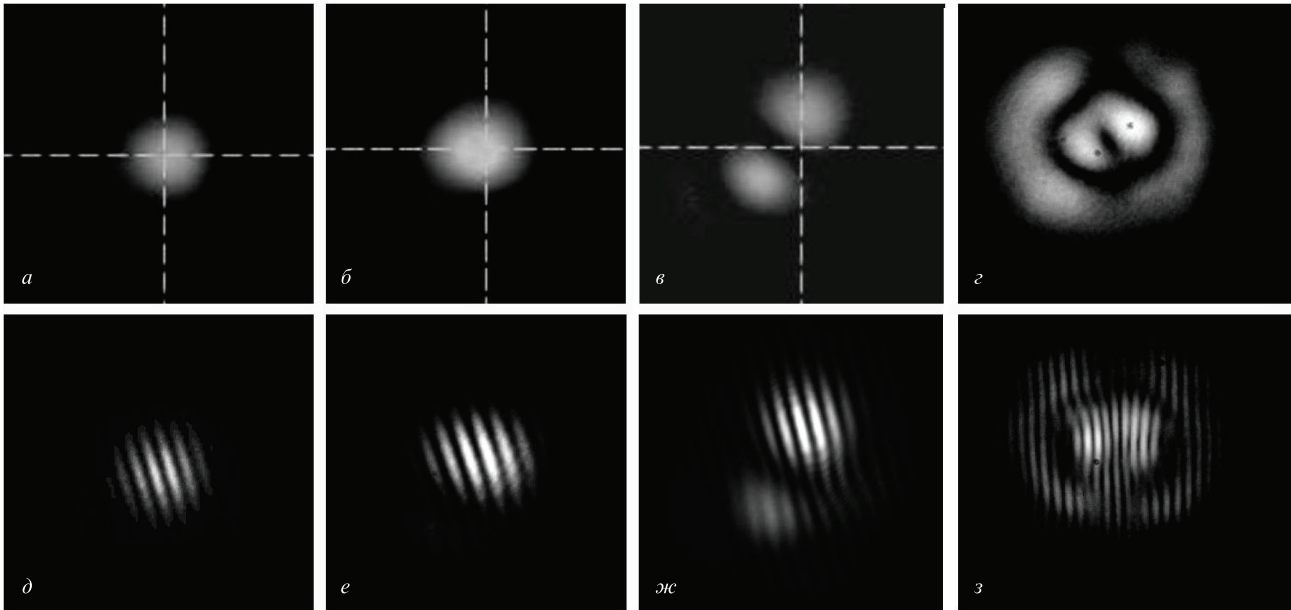


Рис.4. Интенсивности ($a-d$) и фазовые портреты ($e-h$) стоксова пучка вблизи порога ВРМБ ($a-b$, $d-ж$) в трех лазерных вспышках и в режиме насыщения (c , $з$) в случае прямой фокусировки лазерной моды LG_1^1 в кювету ВРМБ.

том, что в стоксовом пучке выделяется основная гауссова мода LG_0^0 с регулярным фазовым фронтом, ортогональная лазерной моде (рис.4, $a, б, д$ и e). Согласно [3, 4] коэффициент усиления стоксовой моды LG_0^0 на 20% превышает коэффициент усиления сопряженной моды LG_1^1 и моды LG_1^{-1} . Это превышение не такое высокое, как 50%-ное превышение при классическом ОВФ в сфокусированных пучках [2], поэтому в ряде лазерных выстрелов стоксов пучок состоит из двух внеосевых пятен (рис.4, $в$), которые повторяют яркие пятна в распределении лазерной интенсивности на рис.3, $б$. Но в любом случае в фазовом портрете стоксова пучка (рис.4, $д-ж$) отсутствует сингулярность, характерная для рис.3, $з$.

При возбуждении ВРМБ в режиме насыщения, когда коэффициент отражения составляет 50%–60%, распределение интенсивности стоксова пучка в дальней зоне (см. рис.4, $з$, $з$) повторяет распределение лазерной моды, состоящее из двух колец (ср. рис.4, $з$ и рис.3, $б$), что и было получено ранее в расчетах [4]. Но, в соответствии с [4], на интерферограмме стоксовой моды (рис.4, $з$) отсутствует осевое ветвление полос, имевшееся в лазерном пучке (рис.3, $з$).

Таким образом, и в линейном режиме, и при насыщении ВРМБ не наблюдается ОВФ лазерной моды LG_1^1 – в стоксовом пучке отсутствует осевой вихрь, т.е. пучок имеет регулярное фазовое распределение. Чем меньше влияние насыщения ВРМБ, тем ближе структура стоксова пучка к основной гауссовой моде LG_0^0 .

Стоит отметить, что более устойчивый эффект ПВФ может быть получен с ростом индекса моды n , т.к. степень селекции основной гауссовой моды при этом возрастает [3, 4, 9]. ПВФ может наблюдаться и для невихревых пучков с $m = 0$ без осевого провала в распределении интенсивности. Анализ показывает, что существует возможность ПВФ вихревой лазерной моды в более сложную (не основную) гауссову моду при рассмотрении режима ВРМБ-усилителя, когда стоксов пучок формируется не из шума, а из входного стоксова сигнала в виде одной конкретной моды.

4. Применение киноформной оптики в схеме фокусировки мод Лагерра–Гаусса в кювету ВРМБ для получения ОВФ

В работах [5, 9] путем расчетов показано, что получение ОВФ вихревого пучка возможно при разрушении его структуры в ВРМБ-среде, например в ВРМБ-зеркале с растром микролинз [10]. Такое ВРМБ-зеркало позволяет провести эффективную угловую фильтрацию необращенной стоксовой компоненты, уменьшить локальные световые нагрузки и избежать появления нежелательных попутных нелинейных эффектов. Схема ВРМБ-зеркала, включающего упорядоченную фазовую пластину в виде растра из малых дифракционных линз Френеля и углового селектора, показана на рис.5, который является фрагментом рис.1. Согласно теории и расчетам [11, 12], а также экспериментам [12–14], существует оптимальная геометрия ВРМБ-зеркала, которая устойчиво дает коэффициент обращения более 90%–95% при коэффициенте пропускания углового селектора 50%–70% и любом уровне насыщения ВРМБ, т.е. любом коэффициенте отражения. Такой вариант фокусировки был оптимальным для получения высокого качества ОВФ при ВРМБ лазерных пучков с регулярными фазовыми искажениями [11–14], поэтому представляло интерес применение его и для исследования ОВФ вихревых пучков.

В проведенных экспериментах в качестве регулярного аберратора использовался восьмиуровневый растр 7 с квадратной упаковкой микролинз размером 1 мм и фо-

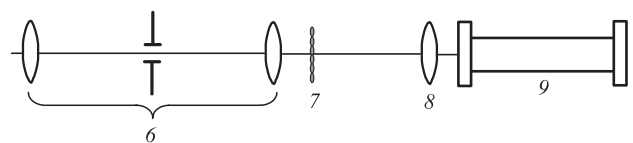


Рис.5. Оптическая схема ВРМБ-зеркала: 6 – угловой селектор; 7 – растр микролинз; 8 – фокусирующая линза ($f = 50$ см); 9 – кювета ВРМБ.

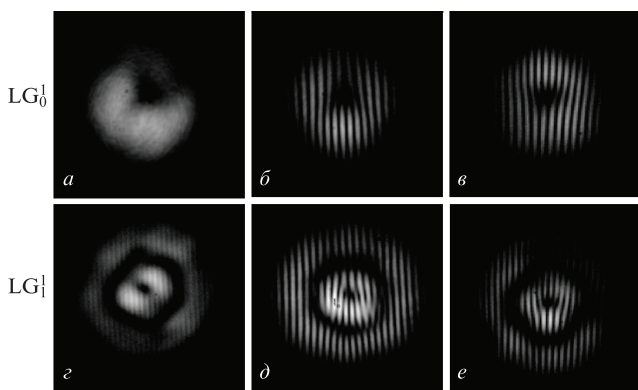


Рис.6. Распределения интенсивности стоковского пучка (a, z), фазовые портреты стоковского пучка (b, d) и фазовые портреты лазерного излучения, отраженного плоским зеркалом (v, e), в случае лазерной моды LG_0^1 ($a-v$) и LG_1^1 ($z-e$).

кусным расстоянием 200 мм. Использование такого расстояния давало наименьшую пороговую энергию для возбуждения ВРМБ. Расстояние между растром 7 и линзой 8 выбиралось таким образом, чтобы в кювете находились обе характерные яркие зоны интенсивности лазерного пучка – фокальная плоскость линзы 8 и изображение фокальной плоскости микролинз растра – с необходимым расстоянием между ними. Из кюветы отраженное излучение стоковой компоненты проходило через угловой селектор 6, после чего его распределение в дальней зоне и фазовый портрет сравнивались с соответствующими характеристиками лазерной моды (рис.6). Коэффициент отражения излучения от ВРМБ-кюветы составлял около 15%.

Из рис.6 видно, что поперечное распределение интенсивности стоковых мод в дальней зоне и их фазовые портреты совпадают с аналогичными распределениями и фазовыми портретами лазерных мод LG_0^1 и LG_1^1 на рис.3. Это говорит о высоком качестве ОВФ. Для того чтобы дополнительно убедиться, что стоков пучок является фазово-сопряженным лазерному, в специально проведенных экспериментах ВРМБ-зеркало заменялось на обычное плоское зеркало, и в той же измерительной схеме регистрировался фазовый портрет излучения, отраженного зеркалом (рис.6, v,e). Направление «вилки» в интерферограмме в последнем случае противоположно ее направлению в лазерной моде. Это говорит о том, что при использовании растра в схеме фокусировки лазерного излучения в ВРМБ-кювету имеет место комплексное сопряжение фазы волнового фронта лазерной накачки.

Таким образом, впервые экспериментально продемонстрировано, что ранее найденная оптимальная геометрия ВРМБ-зеркала [11–14] позволяет получить высокое

качество ОВФ лазерного излучения и для пучков с винтовой дислокацией волнового фронта.

5. Заключение

Проведены экспериментальные исследования ВРМБ вихревых лазерных пучков (мод Лагерра–Гаусса LG_0^1 и LG_1^1) в различных условиях фокусировки и при различной энергии импульса накачки.

Экспериментально продемонстрировано, что при ВРМБ вихревой лагерь-гауссовой моды LG_1^1 , прямо сфокусированной в кювету ВРМБ, наблюдается не обращение, а преобразование волнового фронта. Стоксов пучок является безвихревым и в околопороговом режиме представляет собой во многих случаях основную гауссовую моду в соответствии с предсказаниями теории и расчетов.

Экспериментально показано, что ОВФ вихревого лазерного пучка можно достичь при разрушении структуры моды в кювете ВРМБ. Получено ОВФ мод LG_0^1 и LG_1^1 высокого качества в сложном ВРМБ-зеркале, использующем упорядоченный растр микролинз в системе фокусировки лазерного пучка.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-02-01454) и Аналитической ведомственной целевой программы Минобрнауки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект № 1.55.09).

- Soskin M.S., Vassetsov M.V., in *Progress in Optics*, **42**, 219 (2001).
- Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. *Обращение волнового фронта* (М.: Наука, 1985).
- Starikov F.A., Kochemasov G.G. *Opt. Commun.*, **193**, 207 (2001).
- Starikov F.A., Kochemasov G.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4403**, 217 (2001).
- Starikov F.A., Dolgoplov Yu.V., Kopalkin A.V., et al. *J. Phys. IV*, **133**, 683 (2006).
- Starikov F.A., Dolgoplov Yu.V., Kopalkin A.V., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7009**, 70090E (2008).
- Багдасаров В.Х., Гарнов С.В., Денисов Н.Н. и др. *Квантовая электроника*, **39**, 785 (2009).
- Andreev N., Kulagin O., Palashov O., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2633**, 476 (1995).
- Стариков Ф.А. В сб. *Нелинейные волны 2006*. Под ред. А.В.Гапонова-Грехова, В.И. Некоркина (Н.Новгород: ИПФ РАН, 2007, с. 206–221).
- Бобров С.Т., Грацианов К.В., Корнев А.Ф. и др. *Оптика и спектроскопия*, **62**, 402 (1987).
- Kochemasov G.G., Starikov F.A. *Opt. Commun.*, **170**, 161 (1999).
- Starikov F.A., Dolgoplov Yu.V., Kochemasov G.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3930**, 12 (2000).
- Стариков Ф.А., Герасименко Н.Н., Долгополов Ю.В. и др. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **65**, 935 (2001).
- Dolgoplov Yu., Kovaldov S., Kochemasov G., et al. *Techn. Dig. Conf. on Lasers and Electro Optics (CLEO/Europe 2003)* (Munich, 2003, v. 27E, paper CF5-4-FRI).