

Криогенный дисковый Yb:YAG-лазер с энергией 120 мДж при частоте повторения 500 Гц

Е.А.Перевезенцев, И.Б.Мухин, И.И.Кузнецов, О.В.Палашов, Е.А.Хазанов

Разработана импульсно-периодическая лазерная система на криогенно охлаждаемых Yb:YAG-дисках. Создание композитов Yb:YAG/YAG и использование проточной системы охлаждения их жидким азотом позволило значительно уменьшить влияние усиленного спонтанного излучения. Средняя мощность излучения на выходе системы составила 60 Вт.

Ключевые слова: импульсный лазер, дисковый лазер, Yb:YAG, криогенное охлаждение.

1. Введение

Активные элементы (АЭ) в форме тонких дисков благодаря эффективному теплоотводу и слабой самофокусировке широко используются для создания лазеров с высокой средней и пиковой мощностью. При этом в качестве активного иона все чаще используется Yb³⁺. Это связано с небольшим дефектом энергии кванта (~9%) и отсутствием поглощения из возбужденного состояния [1, 2]. Для сравнения укажем, что в АЭ, легированных ионами Nd, более 30% мощности накачки переходит в тепло [3] из-за большого дефекта энергии кванта и паразитных процессов ап-конверсии, кросс-релаксации и т. п. [4]. Небольшой дефект энергии кванта иона Yb обусловлен близостью основного и нижнего рабочего уровней, поэтому при комнатной температуре нижний лазерный уровень заселен примерно на 5% согласно распределению Больцмана, и система является лишь квазичетырехуровневой. Данную проблему удобно решать путем охлаждения АЭ до криогенных температур (ниже 200 К), поскольку при этом значительно увеличиваются сечения усиления и поглощения [5–7], а также улучшаются термооптические константы среды [8–10].

В Институте прикладной физики РАН ведутся работы по созданию криогенного дискового лазера с высокой средней и пиковой мощностью, при этом используются все преимущества АЭ из Yb:YAG, охлаждаемых при помощи жидкого азота. Значительное время жизни возбужденного состояния среды Yb:YAG (~1 мс) позволяет рассчитывать на накопление достаточно большой энергии в каждом отдельном импульсе, а хорошая теплопроводность (особенно при охлаждении) – на работу системы с высокой частотой повторения. Планируется создать лазерную систему с энергией в импульсе ~0.5 Дж и частотой повторения ~1 кГц (соответствующей обратной времени жизни в среде). В этом случае энергия непрерывной накачки используется наиболее эффективно. Применение дисковых активных элементов способствует умень-

шению тепловых искажений за счет продольного градиента температуры. Кроме того, из-за малой толщины АЭ значительно увеличивается порог пробоя АЭ, что позволяет реализовать ультракороткую длительность импульса (~100 пс) при довольно большой плотности энергии в импульсе.

Первые экспериментальные результаты по данному лазеру (100 мДж, 200 Гц) опубликованы в работе [11]. Для дальнейшего продвижения был предпринят ряд мер по модернизации установки. Разработана собственная технология диффузионной сварки, позволяющая изготавливать «сэндвич»-структуры из тонкого диска Yb:YAG и толстого диска YAG. Перспективность таких композитных АЭ описана в [12]. По сравнению с обычными дисковыми АЭ в «сэндвичах» значительно меньше потери энергии за счет усиленного спонтанного излучения (УСИ) и выше порог паразитной генерации. К тому же они обладают большей механической прочностью и лучшим теплоотводом. Стоит заметить, что уменьшение УСИ приводит не только к увеличению запасенной энергии, но и к уменьшению тепловой нагрузки на АЭ. Однако тепловыделение все равно достаточно высокое, и при пассивном охлаждении азот начинает кипеть, что приводит к значительному ухудшению теплоотдачи. Для решения этой проблемы была разработана проточная система охлаждения жидким азотом, позволившая существенно увеличить частоту следования импульсов лазера.

В настоящей работе приведены данные, полученные после ряда усовершенствований установки. В первой части описаны результаты по генерации и усилению излучения в предусилительном каскаде, во второй части – результаты по усилению излучения в основном (выходном) каскаде.

2. Задающий генератор и предусилитель

Схема криогенной задающей лазерной системы и предусилителя (ПУ) изображена на рис.1. Два дисковых активных элемента из кристаллов Yb:YAG помещены внутри общей вакуумной криогенной камеры с противоположных сторон. Каждый кристалл со стороны зеркала припаян при помощи индия к теплоотводу из CuW, охлаждаемому до температуры жидкого азота. Выбор сплава CuW обусловлен тем, что он имеет близкий к YAG коэффициент теплового расширения. Для защиты кристаллов от обмерзания давление в камере было менее 10⁻⁸ мбар.

Е.А.Перевезенцев, И.Б.Мухин, И.И.Кузнецов, О.В.Палашов, Е.А.Хазанов. Институт прикладной физики Российской академии наук, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: khazanov@appl.sci-nnov.ru

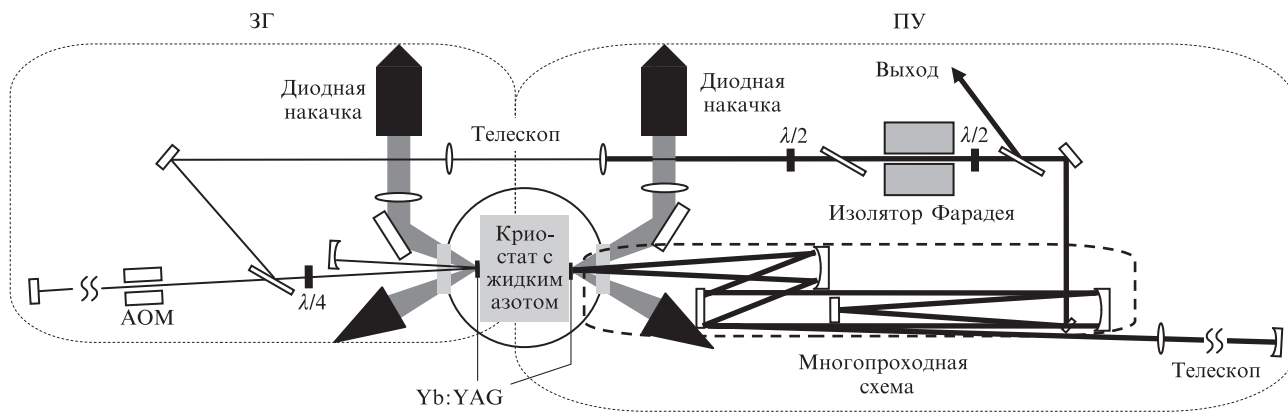


Рис.1. Принципиальная схема задающей лазерной системы и предусилителя.

В задающем генераторе (ЗГ) использовались лазерные диоды накачки с волоконным выходом и максимальной мощностью 70 Вт, а также АЭ с уровнем допирования 10 ат.% (диаметром 15 мм, различной толщины). Для получения генерации реализована схема с одним V-образным проходом, модуляция добротности обеспечивалась акустооптическим модулятором (АОМ). При диаметре пятна излучения накачки на АЭ 1.5 мм удалось получить на выходе пучок высокого качества с энергией 2 мДж в импульсе длительностью 70 нс при частоте следования 1 кГц (рис.2). При этом девиация выходной энергии составляла ~1% в течение двух часов работы. На рисунке видно увеличение дифференциальной эффективности с 7% до 14% при замене дискового АЭ на композитный «сэндвич». Дальнейшее увеличение выходной энергии ограничивалось пробоем материала АЭ и мощностью излучения накачки. Дифференциальную эффективность можно увеличить, уменьшив отражения от входного окна и заменив имеющийся кристалл с временем жизни возбужденного состояния 500 мкс на кристалл с временем жизни 900 мкс.

Диаметр пучка, выходящего из генератора, увеличивался телескопом до 3 мм, затем пучок проходил через изготовленный нами изолятор Фарадея и попадал в ПУ. Одним из ключевых факторов, ограничивающих рабочую частоту ПУ, является высокая плотность тепловыделения, приводящая к закипанию азота и резкому ухудшению тепловода. Для предотвращения этого использовалась система проточного охлаждения жидким азотом.

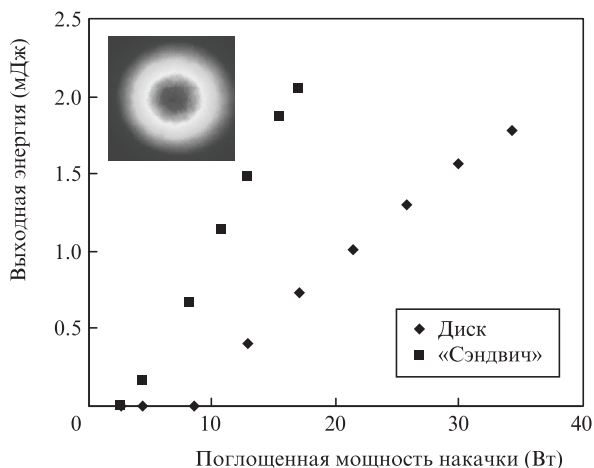


Рис.2. Зависимость энергии на выходе задающего генератора от поглощенной мощности накачки в случае активного элемента в виде Yb:YAG-диска и Yb:YAG/YAG-«сэндвича».

Диск Yb:YAG припаивался к радиатору, обратная сторона которого находилась в резервуаре с жидким азотом. Сам АЭ при этом находился в вакуумной камере с окном для прохода излучения накачки и усиливаемого излучения. Криогенный насос был погружен в резервуар с жидким азотом, при этом выходное отверстие насоса направлено на радиатор. Преимущества проточной системы охлаждения по сравнению с заливной (пассивной) видны из экспериментов по измерению коэффициента усиления в режиме малого сигнала и фазовых искажений в АЭ толщиной 900 мкм и диаметром 15 мм при диаметре пятна на-

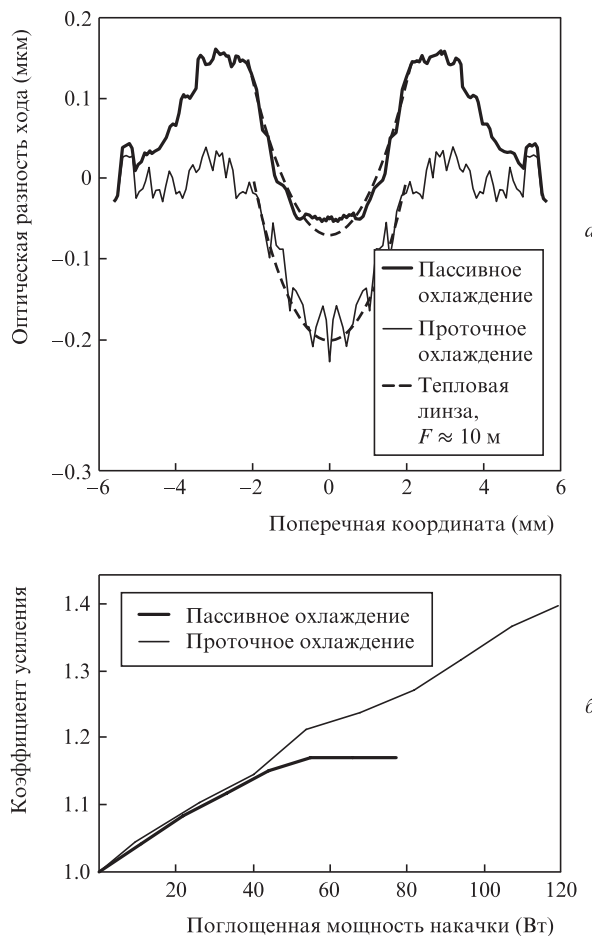


Рис.3. Зависимость оптической разности хода от поперечной координаты (а) и коэффициента усиления в режиме малого сигнала от поглощенной мощности накачки (б) при проточном и пассивном охлаждении активного элемента.

качки 3.8 мм. Результаты измерения фазовых искажений при помощи интерферометра Майкельсона представлены на рис.3,*а* при поглощенной мощности накачки 140 Вт. Видно, что в случае пассивного охлаждения искажения обусловлены как образованием тепловой линзы, так и деформацией диска как целого, тогда как при проточном охлаждении деформации отсутствуют, и, следовательно, средняя температура АЭ значительно ниже. Преимущество системы проточного охлаждения хорошо видно и из результатов экспериментов по измерению коэффициента усиления малого сигнала (рис.3,*б*). В случае пассивного охлаждения величина усиления ограничена мощностью накачки, при которой начинает закипать азот (толстая сплошная кривая), а при проточном охлаждении усиление продолжает расти с ростом мощности накачки (тонкая сплошная кривая).

В последующих экспериментах по усилению в ПУ использовались диодная накачка с волоконным выходом (максимальная мощность 300 Вт) и композитные АЭ различной толщины диаметром 15 мм, с легированием 5 ат.% или 10 ат.%. Для обеспечения девяти V-образных проходов через АЭ применялась многопроходная схема [13]. На рис.4,*а* показаны зависимости коэффициента усиления в режиме малого сигнала от пиковой поглощенной мощности накачки. При частоте следования сигнала 300 Гц длительность импульса накачки составила 1 мс, а при частоте 1 кГц использовалась непрерывная накачка. Как видно из рисунка, в последнем случае (рис.4,*а*, квадраты)

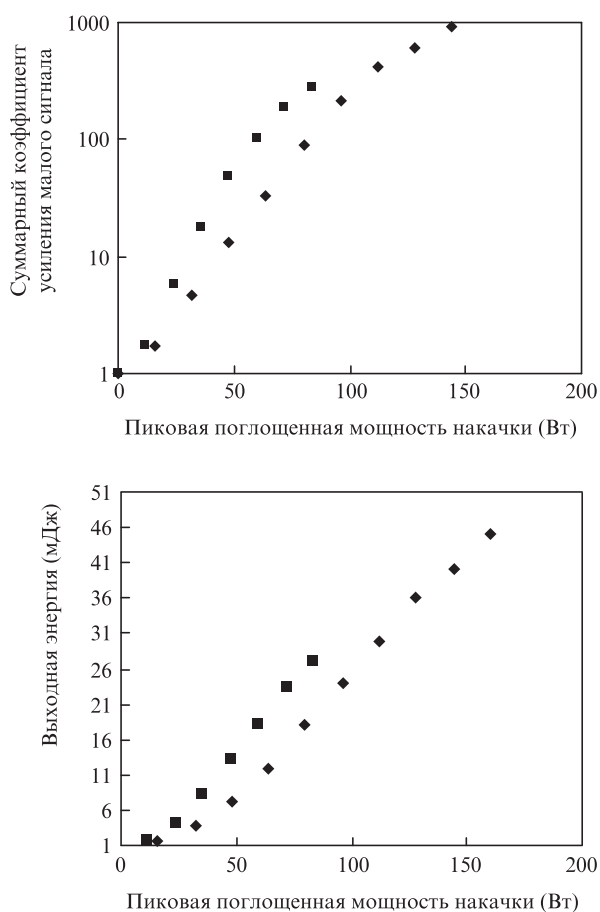


Рис.4. Зависимость суммарного коэффициента усиления в режиме малого сигнала (*а*) и выходной мощности предварительного усилителя (*б*) от пиковой поглощенной мощности накачки при частоте повторения 300 (♦) и 1000 Гц (■).

коэффициент усиления выше, что объясняется большим временем для накопления инверсии. В результате получен высокий коэффициент усиления (~ 1000). Это говорит о том, что данная схема может быть альтернативой регенеративному усилителю.

Непрерывная накачка обеспечивает и большую выходную энергию (рис.4,*б*), поскольку в этом случае накопление энергии происходит не с нуля, как при частоте 300 Гц, а с некоторого остаточного уровня (усиливаемый импульс забирает не всю накопленную энергию). В целом на выходе ПУ удалось получить энергию 47 мДж на частоте 300 Гц и 27 мДж на частоте 1 кГц. Значения выходной энергии изменялись в пределах 3%. При этом эффективность по накачке составила $\sim 33\%$, что является достаточно большой величиной для импульсно-периодических лазерных систем. Дальнейшее увеличение энергии при импульсном режиме накачки ограничивалось пробоем, а при непрерывном – возникновением неустойчивости в работе системы из-за вибраций, связанных с активным кипением азота. Эффективность ПУ можно увеличить, уменьшив потери на просветляющих и отражающих покрытиях. Для улучшения качества выходного излучения необходимо уменьшать искажения, возникающие при охлаждении АЭ.

3. Основной усилитель

Схема основного усилителя (ОУ) представлена на рис.5. Для получения большего коэффициента усиления (и, соответственно, большей запасенной энергии) использовались два активных элемента. Как и в предыдущих каскадах, АЭ представляют собой Yb:YAG/YAG-«сэндвичи» (легирование 10 ат.%) диаметром 20 мм, с толщиной Yb:YAG 900 мкм. Для накачки каждого АЭ служил модуль диодной накачки с волоконным выходом и максимальной пиковой мощностью 1 кВт. Из-за большого объема и большой площади вакуумных соединений криостата ОУ нам не удалось защитить кристаллы ОУ от обмерзания путем создания глубокого вакуума, как это было сделано в ПУ. Однако проблему удалось решить, создав внутри камеры небольшой поток газообразного азота. В этом случае требования к качеству вакуумных уплотнений становятся значительно ниже.

Для усиления сигнала с энергией в несколько десятков мДж до энергии в несколько сотен мДж в ОУ реализовано четыре V-образных прохода через каждый кристалл или четыре W-образных прохода через активные элементы усилителя. Выходящий из ПУ пучок увеличивается телескопом в диаметре до 6 мм, проходит через поляризатор и входит в вакуумную камеру чуть выше плоскости расположения активных элементов через верхнее окно W-проходной схемы, после чего направляется на первый АЭ, отражается в нижнее зеркало W-проходной схемы и затем на второй АЭ. От него пучок попадает в верхнее зеркало перископа и смещается на нижнее зеркало. Далее пучок проходит через второй АЭ, верхнее зеркало W-проходной схемы, первый АЭ и выходит в нижнее окно W-проходной схемы. Здесь пучок отражается обратно, изменяя свою поляризацию на ортогональную, и выходит из схемы ОУ через поляризатор. Телескоп переносит изображение с перископа назад на перископ, сохраняя приемлемое качество пучка. Диаметр пятна накачки на каждом кристалле составляет 8 мм.

Зависимость выходной энергии от пиковой поглощенной мощности накачки представлена на рис.6. Длитель-

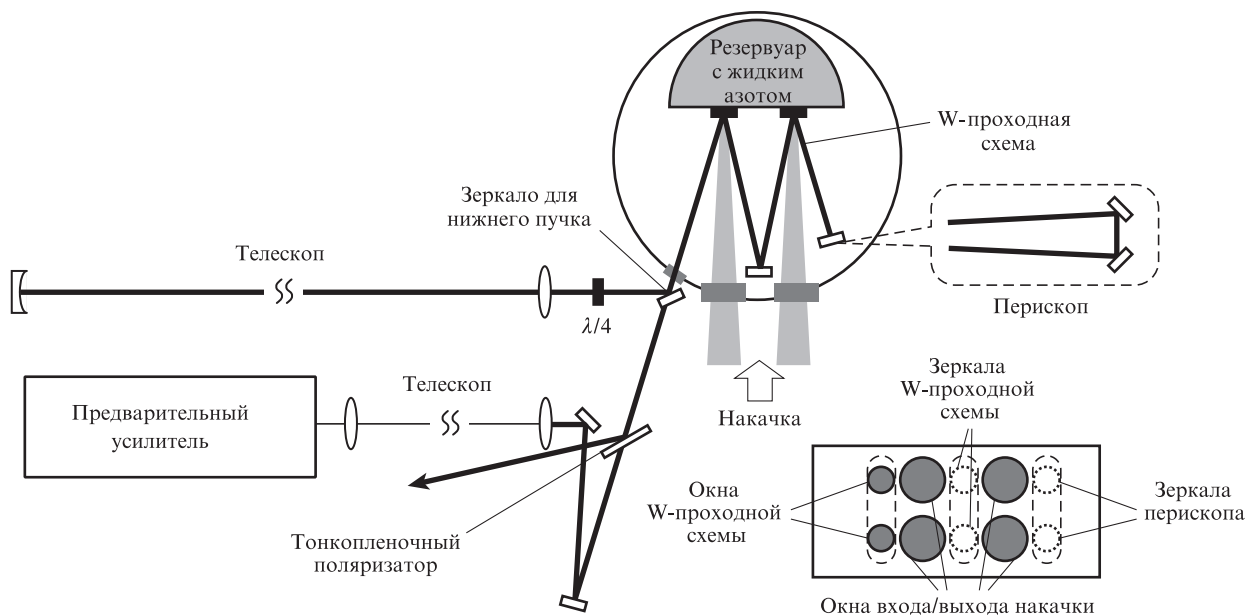


Рис.5. Принципиальная схема основного усилителя.

ность импульса накачки составляла 1.2 мс. В итоге удалось увеличить энергию в импульсе длительностью 70 нс с 10 до 120 мДж при частоте следования 500 Гц.

Кристаллы выдерживали необходимую тепловую нагрузку. Однако даже незначительное влияние паразитных тепловых эффектов оказалось весьма существенным. Из-за тепловой линзы диаметры сигнального пучка на кристаллах становились различными, а из-за теплового клина, возникающего после включения накачки, переставали совпадать центры пучков разных W-обходов. Поэтому для дальнейшего увеличения выходной энергии необходимо усовершенствовать криостат и переходить к использованию многопроходной схемы, хорошо зарекомендовавшей себя в ПУ. При этом появится возможность компенсации тепловой линзы, а значит, и точного согласования диаметров пучков накачки и сигнала на каждом обходе через АЭ. Можно будет выбрать оптимальное количество обходов. Угловые отклонения пучка из-за теплового клина также легко скомпенсируются. Как показывают результаты работы с ПУ, можно рассчитывать на извлечение половины энергии, запасенной в активных элементах ОУ, что, согласно нашим расчетам, соответствует 0.5 Дж на выходе ОУ.

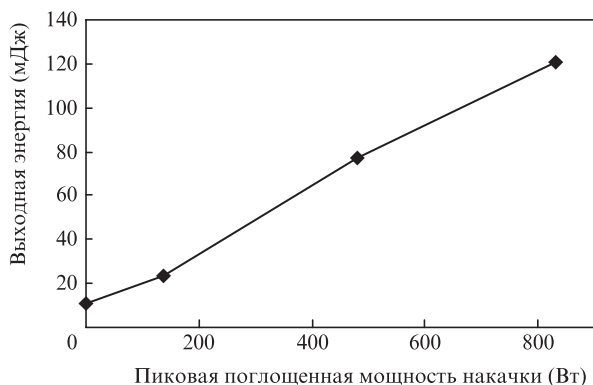


Рис.6. Зависимость энергии на выходе основного усилителя от пиковой поглощенной мощности накачки при длительности импульса накачки 1.2 мс и частоте следования 500 Гц.

4. Заключение

Разработана импульсно-периодическая лазерная система на криогенно охлаждаемых Yb:YAG-дисках. Создана и апробирована оригинальная проточная система охлаждения жидким азотом, позволившая работать с непрерывной диодной накачкой. С помощью разработанной нами технологии термодиффузионной сварки созданы композитные АЭ, в которых значительно ослаблен эффект УСИ. Создана стабильно и надежно работающая задающая система с энергией на выходе 27 мДж, частотой повторения 1 кГц и достаточно высокой (~33%) эффективностью по накачке. Отмечено, что при переходе от непрерывной накачки к импульсной с частотой следования импульсов 300 Гц выходная энергия ПУ уменьшается. Это говорит о хорошем теплоотводе от АЭ при непрерывной накачке, в противном случае за счет нагрева уменьшалось бы сечение усиления, а значит, и запасенная в кристаллах энергия. На выходе лазера получена энергия 120 мДж при частоте следования импульсов 500 Гц.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения».

1. Krupke W. *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, **6**, 1287 (2000).
2. Fan T.Y. *IEEE J. Quantum Electron.*, **29**, 1457 (1993).
3. Sennaroglu A. *Appl. Opt.*, **38**, 3253 (1999).
4. Brown D.C. *IEEE J. Quantum Electron.*, **34**, 560 (1998).
5. Dong J., Bass M., Mao Y., Gan P.D.F. *J. Opt. Soc. Am. B*, **20** (9), 1975 (2003).
6. Brown D.C., Cone R.L., Sun Y., Equall R.W. *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, **11** (3), 604 (2005).
7. Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А., Вяткин А.Г., Перевезенцев Е.А. *Квантовая электроника*, **41** (11), 1045 (2011).
8. Fan T.Y., Daneu J.L. *Appl. Opt.*, **37** (9), 1635 (1998).
9. Bourdet G.L., Yu H. *Appl. Opt.*, **46** (23), 6033 (2007).
10. Brown D.C. *IEEE J. Quantum Electron.*, **34**, 2383 (1998).
11. Mukhin I., Perevezentsev E., Vyatkin A., Vadimova O., Palashov O., Khazanov E. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8080**, 80800B (2011); doi:10.1117/12.886745.
12. Kouznetsov D., Bisson J.-F. *J. Opt. Soc. Am. B*, **25** (3), 338 (2008).
13. Neuhaus J., Kleinbauer J., Killi A., Weiler S., Sutter D., Dekorsy T. *Opt. Lett.*, **33** (7), 726 (2008).