

Стабильная генерация лазера на керамике $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$ с резонансной накачкой ($\lambda = 2117$ нм) в режиме модуляции добротности и синхронизации мод*

Яцзе Шэнь, Энхао Ли, Цзюнь Ван, Динюань Тан, Дэюань Шэнь

Сообщается о стабильной генерации на длине волны 2117 нм лазера на керамике $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$ с резонансной накачкой в режиме синхронизации мод и модуляции добротности с использованием насыщаемого поглотителя на основе InGaAs/GaAs . Средняя выходная мощность лазера составила 330 мВт при поглощенной мощности накачки 2.7 Вт. Стабильные импульсы синхронизации мод с частотой следования 98.9 МГц и 100%-ной глубиной модуляции группировались в цуг импульсов, возникающих за счет модуляции добротности; огибающие импульса цуга имели длительность ~ 1.7 мкс. Длительность импульсов синхронизации мод по оценке не превышала 1.5 нс.

Ключевые слова: синхронизация мод с модуляцией добротности, средний инфракрасный диапазон, лазерная керамика, $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$, импульсный лазер.

1. Введение

Импульсные твердотельные лазеры, генерирующие в спектральной области 2.1 мкм, представляют особый интерес в ряде приложений, например, спектроскопия с временным разрешением, лидары, лазерная медицина, а также генерация суперконтинуума среднего ИК диапазона и частотных гребенок [1–6]. Обычно резонансная (in-band) накачка материалов, однократно легированных Ho, таких как Ho:YAG , Ho:YAP , Ho:YLF и т. п. [7–12], позволяет эффективно генерировать как мощное непрерывное, так и импульсное лазерное излучение в области 2.1 мкм, благодаря высокой квантовой эффективности, большому сечению усиления и относительной простоте температурного контроля [13].

Керамика из легированного гольмием оксида иттрия ($\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$), одного из поликристаллических кубических полупрозрачных оксидов, обладает существенными достоинствами: высокой теплопроводностью (~ 11.1 Вт/(м·К) для $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$ при комнатной температуре с содержанием Ho 0.7 ат.%), низкой максимальной энергией фононов (~ 597 см⁻¹), а также высокой механической прочностью [14–16]. Это делает такую керамику перспективным активным элементом для мощного лазера, генерирующего в области ~ 2.1 мкм. Недавно сообщалось, что при резонансной накачке излучением мощного тулиевого волоконного лазера на длине волны 1931 нм удалось увеличить выходную мощность лазера на керамике $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$ до 113 Вт при общей дифференциальной эффективности 55.6% [17]. Особо следует отметить, что сильное кристал-

лическое поле матрицы Y_2O_3 приводит к относительно большому расщеплению штарковских мультиплетов. По этой причине полоса излучения в длинноволновой области получается относительно широкой [18, 19], что делает $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$ идеально подходящим для генерации ультракоротких импульсов с длиной волны около 2.1 мкм. Однако о демонстрации работы лазера на основе полупрозрачного оксида, легированного ионами Ho, на длине волны ~ 2.1 мкм в режиме синхронизации мод (СМ) пока не сообщалось.

Метод пассивной синхронизации мод с использованием полупроводникового насыщаемого поглотителя (ПНП) широко применяется для генерации ультракоротких импульсов благодаря своей простоте, надежности и устойчивой функциональности. На сегодняшний день проведено несколько исследований работы твердотельных лазеров на длине волны ~ 2.1 мкм с использованием ПНП для синхронизации мод. Так, лазер на керамике Ho:YAG в режиме перестраиваемой по длине волны непрерывной синхронизации мод (НСМ), полученной с помощью поверхностного ПНП на основе GaSb, продемонстрировал генерацию импульсов с минимальной длительностью 2.1 пс на длине волны 2064 нм [20]. Полупроводниковый насыщаемый поглотитель на основе InGaAs/GaAs использовался для модуляции добротности (МД) с одновременной синхронизацией мод (режим МД-СМ) Ho:YVO_4 -лазера, возбуждаемого тулиевым лазером с диодной накачкой [21].

В настоящей работе описана стабильная генерация лазера на керамике $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$ на длине волны 2117 нм в режиме синхронизации мод и модуляции добротности с использованием коммерчески доступного ПНП на основе InGaAs/GaAs . При резонансной накачке тулиевым волоконным лазером (собственного изготовления) высокой яркости на длине волны 1931 нм достигнута средняя выходная мощность более 330 мВт в режиме генерации стабильных импульсов синхронизации мод с частотой следования 98.9 МГц. Импульсы синхронизации мод со 100%-ной глубиной модуляции группировались в цуг импульсов, создаваемых за счет модуляции добротности;

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

Yajie Shen, Jun Wang, Dingyuan Tang, Deyuan Shen, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China; e-mail: mrde@jsnu.edu.cn
Enhao Li, Jiangsu Collaborative Innovation Center of Advanced Laser Technology and Emerging Industry, Xuzhou 221116, China

длительность огибающей импульса цуга составляла несколько микросекунд. Насколько нам известно, это первая демонстрация работы лазера на полупроводниковых оксидах с модуляцией добротности и синхронизацией мод. Экспериментальные результаты показали, что керамика $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$ является перспективной усиливающей средой для стабильных лазеров с модуляцией добротности и обладает большим потенциалом для создания лазеров с непрерывной синхронизацией мод на длине волны ~ 2.1 мкм.

2. Экспериментальная установка

На рис.1 показана схема лазера на керамике $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$, работающего в режиме МД-СМ. Источником оптической накачки служил тулиевый волоконный лазер собственного изготовления (длина волны 1931 нм) с высокой яркостью, с выходной мощностью более 5 Вт и с дифракционно-ограниченным качеством пучка. Выходное излучение тулиевого волоконного лазера коллимировалось, а затем фокусировалось телескопической системой 1:7 (Л1 и Л2 на рис.1) на керамику $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$ в пятно радиусом ~ 35 мкм.

Для работы в режиме синхронизации мод с модуляцией добротности использовался сложенный резонатор Х-типа, образованный пятью зеркалами. Покрытие дихроичных поворачивающих зеркал (31, 32, 33 и 34 на рис.1) обеспечивало высокий коэффициент отражения ($R > 99.8\%$) на длинах волн 2040–2250 нм и было антиотражающим ($T > 99.8\%$) в диапазоне 1880–1950 нм; радиусы кривизны зеркал составляли 100, 100, 100 и 50 мм соответственно. Плоскопараллельное зеркало (В3 на рис.1) с пропусканием 2% в диапазоне длин волн 2000–2300 нм служило для вывода излучения. Используемая в наших экспериментах керамика $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$ была изготовлена собственными силами с использованием технологии спекания с горячим изостатическим прессованием, детально описанной в работе [16]. Активный элемент из керамики $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$ с содержанием легирующей примеси 0.5 ат. % имел форму прямоугольного параллелепипеда с размерами поперечного сечения 1.4×3 мм и длиной 20 мм, оба конца которого имели покрытие, антиотражающее в диапазоне длин волн 1880–2150 нм. Активный элемент монтировался на медном теплоотводе с водяным охлаждением, поддерживающим температуру 20°C , и располагался в центре конфокального резонатора, образованного зеркалами 31 и 32. Внутри резонатора помещался ПНП на основе InGaAs/GaAs (BATOP GmbH, SA-2000-1-10ps) с антиотражающим покрытием в диапазоне 1900–2100 нм, интенсивностью насыщения 300 мкДж/см², глубиной модуляции 0.6% и временем релаксации 10 пс. Приклеенный к медному радиатору для пассивного теплоотвода ПНП находился во второй перетяжке пучка внутри резонатора,

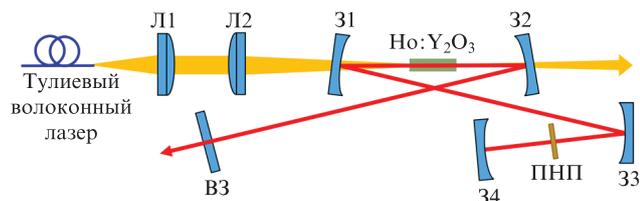


Рис.1. Схема лазера на керамике $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$, генерирующего в режиме синхронизации мод с модуляцией добротности: Л1, Л2 – линзы телескопической системы; 31–34 – дихроичные поворачивающие зеркала; В3 – выходное зеркало.

образованного зеркалами 33 и 34. Длины двух плеч резонатора поддерживались приблизительно равными друг другу. Полная длина резонатора составляла примерно 1.52 м, что соответствовало межмодовому расстоянию ~ 99 МГц. Для минимизации астигматизма углы между пучками сложенного резонатора были менее 7° . По оценке, радиусы перетяжек пучка TEM_{00} -моды на керамике $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$ и на ПНП составляли ~ 36 и ~ 40 мкм соответственно.

3. Результаты и их обсуждение

Сначала лазерные рабочие характеристики керамики $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$ в непрерывном режиме измерялись без использования ПНП. Порог непрерывной генерации достигался при поглощенной мощности накачки ~ 0.8 Вт, и при мощности 2.7 Вт выходная мощность лазера достигла 0.77 Вт (рис.2, кружки). Соответствующая дифференциальная эффективность η оптического преобразования поглощенной мощности составила 46%.

После введения ПНП в резонатор лазер при поглощенной мощности накачки в диапазоне 1–1.3 Вт работал в режиме нестабильной синхронизации мод с модуляцией добротности. Тщательная юстировка резонатора позволила реализовать стабильную работу лазера в режиме синхронизации мод с модуляцией добротности при превышении поглощенной мощности накачки 1.3 Вт. В режиме МД-СМ лазер излучал более 330 мВт средней выходной мощности при максимальной поглощенной мощности накачки 2.7 Вт (рис.2, квадраты), что соответствует средней дифференциальной эффективности 21%. Снижение эффективности при переходе от непрерывного режима в режим синхронизации мод с модуляцией добротности составило 41.3%.

Временные характеристики лазера на керамике $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$ в режиме синхронизации мод с модуляцией добротности определялись с помощью осциллографа с шириной полосы 1 ГГц и быстродействующего InGaAs -приемника (Newport, 818-BB-51, постоянная времени 28 пс). Зависимость длительности и частоты следования импульсов цуга при модуляции добротности от поглощенной мощности накачки показана на рис.3. Частота следования импульсов изменялась от 19.4 до 43.9 кГц с ростом поглощенной мощности накачки от 1.3 до 2.7 Вт, при этом длительность огибающей импульса цуга уменьшалась.

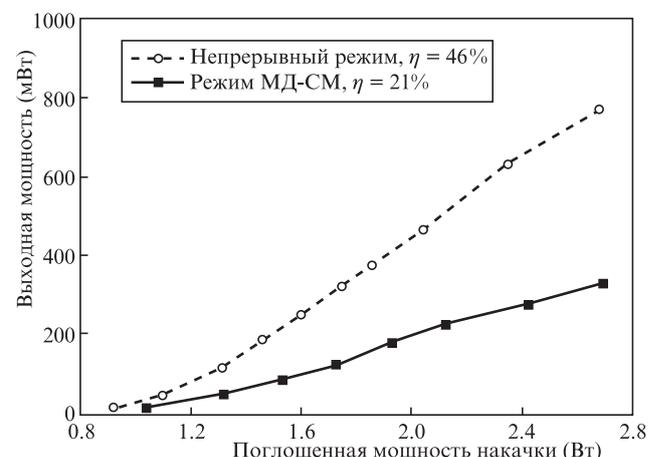


Рис.2. Зависимость выходной мощности от поглощенной мощности накачки в непрерывном режиме (○) и режиме МД-СМ (■).

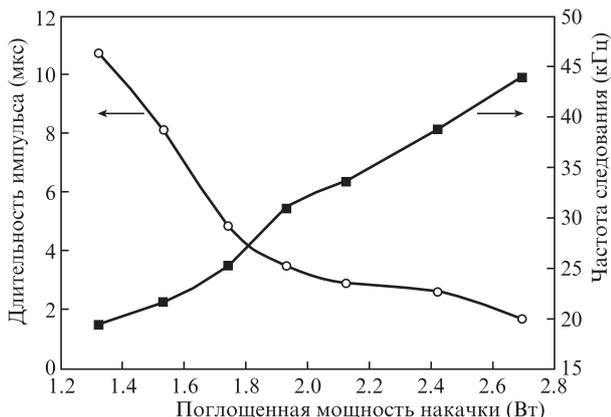


Рис.3. Зависимость длительности огибающей (○) и частоты следования (■) импульсов цуга при модуляции добротности от поглощенной мощности накачки.

При максимальной поглощаемой мощности накачки 2.7 Вт минимальная длительность огибающей импульса цуга при модуляции добротности составляла 1.4 мкс на уровне половины высоты при частоте их следования 43.9 кГц.

Типичный цуг импульсов при модуляции добротности, огибающая отдельного импульса цуга и пакет импульсов синхронизации мод внутри огибающей импульса цуга показаны на рис.4. Стабильные импульсы модуляции добротности имели флуктуацию амплитуды менее 5% (рис.4,а). Ширина огибающей импульса цуга, заполненной импульсами синхронизации мод со 100%-ной глубиной модуляции, составляла 1.7 мкс (рис.4,б).

На осциллограмме импульсов синхронизации мод, заполняющих огибающую отдельного импульса цуга (рис.4,в), видно, что их период следования равен ~10.1 нс.

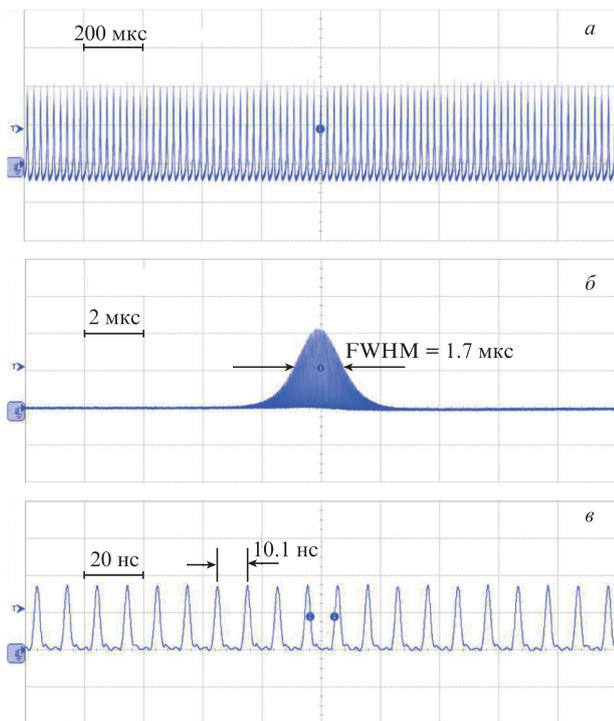


Рис.4. Осциллограммы цуга импульсов модуляции добротности (а), огибающей отдельного импульса цуга в режиме МД-СМ (б) и последовательности импульсов синхронизации мод внутри огибающей импульса цуга в увеличенном масштабе (в).

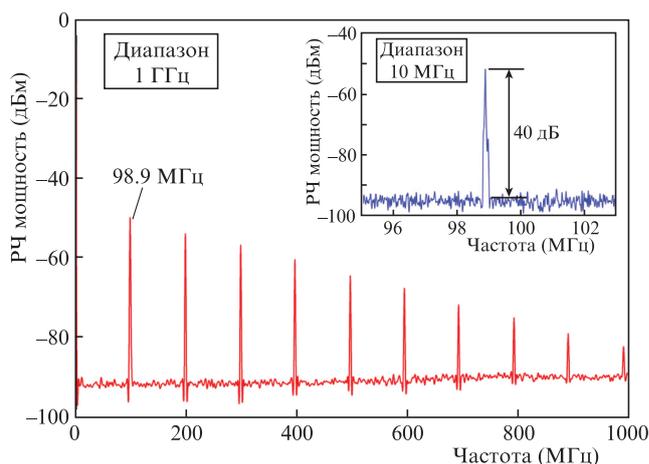


Рис.5. Радиочастотные спектры излучения лазера на керамике $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$ в режиме МД-СМ при полосе разрешения 1 кГц. На вставке – фундаментальная частота биений. Ширина полосы 1 кГц.

Соответствующая частота следования импульсов составляет ~99 МГц, что хорошо согласуется с временем обхода резонатора. При этом длительность импульсов синхронизации мод была менее 1.5 нс.

Стабильность работы в режиме синхронизации мод с модуляцией добротности характеризуется радиочастотным (РЧ) спектром (рис.5), измеренным с помощью электронного спектроанализатора (Agilent, N9320В) с полосой 3 ГГц. Фундаментальная частота биений находится на частоте 98.9 МГц с отношением сигнал/шум свыше 40 дБ, что говорит о стабильной синхронизации мод лазера на керамике $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$. Спектр излучения лазера в режиме МД-СМ измерялся оптическим спектроанализатором (YOKOGAWA, AQ6375) со спектральным разрешением 0.02 нм (рис.6). Центральная длина волны составляет 2117.8 нм, а спектральная ширина излучения на уровне половины максимума – 0.16 нм.

Согласно критерию минимальной энергии импульса внутри резонатора, для достижения стабильной непрерывной синхронизации мод, описанной в [22], должно выполняться неравенство

$$E_p > E_{pc} = \sqrt{F_{satL} F_{satA} A_{satL} A_{satA} \Delta R},$$

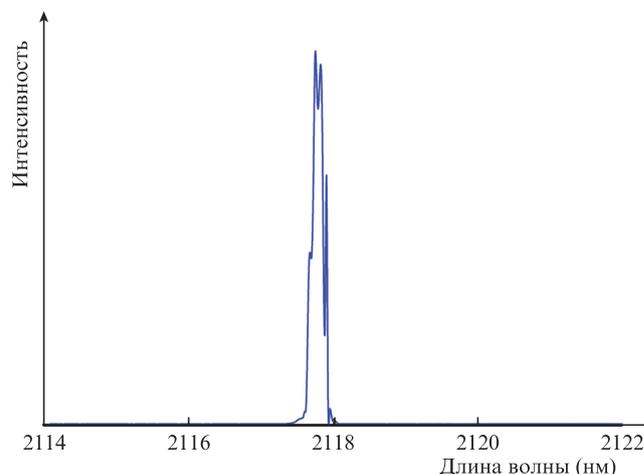


Рис.6. Спектр излучения лазера в режиме МД-СМ.

где E_p – энергия импульса внутри резонатора; F_{satL} , F_{satA} – интенсивности насыщения для активной среды и поглотителя; A_{satL} , A_{satA} – площади лазерной моды внутри активной среды и поглотителя; ΔR – глубина модуляции насыщаемого поглотителя. Для получения непрерывной синхронизации мод, без возникновения режима модуляции добротности, эффект насыщения усиления должен быть достаточно сильным, с тем чтобы предотвратить экспоненциальный рост энергии импульса в результате более сильного просветления поглотителя. Поэтому дальнейшее уменьшение площади лазерной моды на керамике и ПНП, а также использование ПНП с меньшей глубиной модуляции являются эффективными методами подавления модуляции добротности при синхронизации мод. Непрерывная синхронизация мод с улучшенными рабочими характеристиками лазера может быть достигнута в будущем при использовании более короткой керамики $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$, оптимизированного ПНП на основе GaSb с соответствующим регулированием ширины запрещенной зоны, а также измененной конструкции резонатора.

4. Выводы

Итак, мы экспериментально продемонстрировали стабильную генерацию лазера на керамике $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$ на длине волны 2117 нм в режиме синхронизации мод с модуляцией добротности при использовании коммерчески доступного ПНП на основе InGaAs/GaAs . Средняя выходная мощность более 330 мВт была получена при поглощенной мощности накачки 2.7 Вт, что соответствует общей дифференциальной эффективности 21%. Наименьшая длительность огибающей импульса цуга, обусловленного модуляцией добротности, составляла 1.7 нс на уровне половины максимума. Огибающая была заполнена импульсами синхронизации мод со 100%-ной глубиной модуляции и длительностью менее 1.5 нс при частоте следования 98.9 МГц. Мы считаем, что этот стабильный лазер на длину волны 2.1 мкм с синхронизацией мод и модуляцией добротности может стать надежным источником накачки параметрических генераторов или усилителей на ZnGeP_2 для получения лазерного излучения в средней инфракрасной области 3–5 мкм. При дальнейшей оптимизации конструкции резонатора и использовании более короткого керамического активного элемента и специального ПНП представляется возможным достичь

непрерывной синхронизации мод лазера на керамике $\text{Ho:Y}_2\text{O}_3$ с пикосекундными импульсами на выходе.

Работа финансировалась Национальным фондом естественных наук Китая (U1730119, 62035007) и Инновационной программой для аспирантов провинции Цзянсу (KYCX20_2348).

- Scholle K., Lamrini S., Koopmann P., Fuhrberg P., in *Frontiers in Guided Wave Optics Optoelectronics*. Ed. by Bishnu Pal (InTech, 2010, p. 471).
- Ebrahim-Zadeh M., Vodopyanov K. *J. Opt. Soc. Am. B*, **33** (11), MIC1 (2016).
- Lee C., Mohr C., Bethge J., Suzuki S., Fermann M.E., Hartl I., Schibli T.R. *Opt. Lett.*, **37** (15), 3084 (2012).
- Taczak T.M., Killinger D.K. *Appl. Opt.*, **37** (36), 8460 (1998).
- Mandon J., Guelachvili G., Picqué N. *Nat. Photonics*, **3** (2), 99 (2009).
- Swiderski J., Michalska M., Maze G. *Opt. Express*, **21** (7), 7851 (2013).
- Yao W., Li E., Shen Y., Ren C., Zhao Y., Tang D., Shen D. *Laser Phys. Lett.*, **16** (11), 115001 (2019).
- Shen Y., Yao B., Duan X., Zhu G., Wang W., Ju Y., Wang Y. *Opt. Lett.*, **37** (17), 3558 (2012).
- Shen Y., Yao W., Li E., Shao Z., Wang F., Shen D. *Appl. Phys. Express*, **13** (5), 052006 (2020).
- Dergachev A., Moulton P.F., Drake T.E., in *Advanced Solid-State Photonics (TOPS)*. Ed. by C.Denman, I.Sorokina (Optical Society of America, 2005, Vol. 98, paper 608).
- Tang J., Li E., Wang F., Yao W., Shen D. *IEEE Photonics J.*, **12** (2), 1501107 (2020).
- Guo L., Zhao S., Li T., Qiao W., Wang Y. *Opt. & Laser Technol.*, **126**, 106015 (2020).
- Li E., Tang J., Shen Y., Wang F., Wang J., Tang D., Shen D. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **32** (8), 492 (2020).
- Kränkel C. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **21** (1), 250 (2014).
- Word-Daniels A., Newburgh A., Michael A., Merkle L., Dubinskii M. *Proc. SPIE*, **7686**, 76860F (2010).
- Wang J., Zhao Y., Yin D., Liu P., Ma J., Wang Y., Shen D., Dong Z., Kong L., Tang D. *J. Europ. Ceramic Soc.*, **38** (4), 1986 (2017).
- Wang F., Tang J., Li E., Shen C., Wang J., Tang D., Shen D. *Opt. Lett.*, **44** (24), 5933 (2019).
- Koopmann P., Lamrini S., Scholle K., Schäfer M., Fuhrberg P., Huber G. *Opt. Express*, **21** (3), 3926 (2013).
- Newburgh G.A., Word-Daniels A., Michael A., Merkle L.D., Ikesue A., Dubinskii M. *Opt. Express*, **19** (4), 3604 (2011).
- Wang Y., Lan R., Mateos X., Li J., Hu C., Li C., Suomalainen S., Härkönen A., Guina M., Petrov V., Griebner U. *Opt. Express*, **24** (6), 180032 (2016).
- Li G., Yao B., Meng P., Wang W., Ju Y., Wang Y. *Laser Phys.*, **8** (1), 42 (2011).
- Hönninger C., Paschotta R., Morier-Genoud F., Moser M., Keller U. *J. Opt. Soc. Am. B*, **16** (1), 46 (1999).