

Синхронизация фемтосекундного лазера и лазера с модуляцией добротности с точностью 50 пс

Е.В.Катин, В.В.Ложкарев, О.В.Палашов, Е.А.Хазанов

Реализован лазер на Nd:YLF с длительностью импульса 2 нс, синхронизированный с фемтосекундным лазером на Cr:форстерите. Длительность импульса и синхронизация обеспечиваются двумя ячейками Поккельса, импульсы напряжения на которых синхронизованы с фемтосекундным лазером с помощью быстродействующих элементов эмиттерно-связанной логики. Одна из ячеек Поккельса обеспечивает модуляцию добротности, а другая вырезает из гигантского импульса длительностью 15 нс более короткий импульс. Приведенные экспериментальные результаты показывают, что предложенная двухступенчатая схема синхронизации лазера с модуляцией добротности и лазера с пассивной синхронизацией мод позволяет достаточно просто и надежно синхронизировать эти лазеры с джиттером в несколько десятков пикосекунд.

Ключевые слова: синхронизация лазеров, джиттер, ячейка Поккельса, формирование импульса.

1. Введение

В ряде приложений, например в параметрическом усилителе чирпированных импульсов [1–5], требуется точная синхронизация импульсов двух независимых лазеров. Для эффективного параметрического взаимодействия необходимо, чтобы неточность перекрытия импульса накачки и усиливаемого импульса в нелинейном кристалле не превышала 10% длительности самих импульсов. Усиливаемый импульс представляет собой растянутый импульс фемтосекундного лазера, его характерная длительность равна 1 нс. Таким образом, временной джиттер двух лазеров – случайное неконтролируемое смещение импульса одного лазера относительно другого – не должен превышать 100 пс.

Синхронизация двух лазеров, работающих в режиме синхронизации мод, не представляет на сегодняшний день больших трудностей (см., напр., работу [6] и ссылки в ней). Однако для накачки параметрических усилителей чирпированных импульсов необходим импульс, длительность которого в 1.5–2 раза больше длительности усиливаемого импульса [3], т. е. составляет единицы наносекунд. Кроме того, крайне желательно, чтобы генератор этих импульсов работал в импульсном (с модуляцией добротности), а не в непрерывном режиме, т. к. в последнем случае малая энергия импульса существенно затрудняет создание мощной накачки. Реализация стабильного режима активной синхронизации мод с модуляцией добротности при длительности импульса несколько наносекунд крайне затруднена, поскольку в генерации участвует малое число мод (менее 10).

В то же время мощные импульсы такой длительности могут быть легко сформированы в режиме модуляции

добротности с селекцией продольных мод [7, 8]. Их формирование может осуществляться либо непосредственно в очень коротком резонаторе, либо при помощи электрооптических затворов (ЭОЗ), вырезающих короткий импульс из гигантского импульса длительностью 10–30 нс. Таким образом, проблема синхронизации (с джиттером менее 100 пс) лазера с синхронизацией мод и лазера с модуляцией добротности является весьма актуальной. Основная трудность заключается в том, что джиттер между электрическим импульсом, модулирующим добротность, и гигантским импульсом трудно сделать существенно меньшим времени обхода резонатора.

В данной работе предложен и экспериментально реализован метод синхронизации лазера с модуляцией добротности и непрерывного фемтосекундного лазера с пассивной синхронизацией мод с точностью 50 пс.

2. Принцип синхронизации двух лазеров

Сначала детально рассмотрим все причины появления джиттера при синхронизации лазера с пассивной синхронизацией мод и лазера с модуляцией добротности (рис.1). При помощи малоинерционного фотодиода из последовательности импульсов лазера с синхронизацией мод можно легко сформировать последовательность

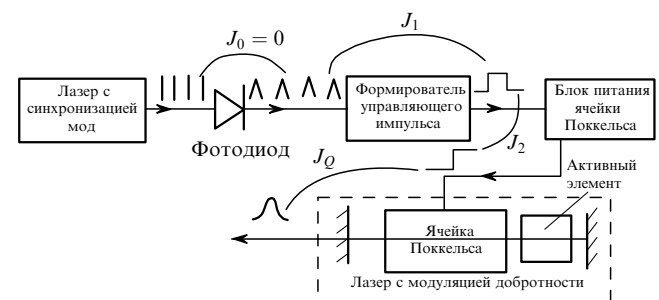


Рис.1. Общая схема синхронизации лазеров с модуляцией добротности и синхронизацией мод.

Е.В.Катин, В.В.Ложкарев, О.В.Палашов, Е.А.Хазанов. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; web-site: www.ipfan.ru/science/science/appl.new/, e-mail: khasanov@appl.sci.nnov.ru

Поступила в редакцию 12 ноября 2002 г.

электрических импульсов длительностью доли наносекунды с джиттером J_0 , существенно меньшим 100 пс. Далее мы этот джиттер учитывать не будем. Из этой последовательности необходимо сформировать один импульс, причем его амплитуда и длительность должны быть такими, чтобы он мог управлять ячейкой Поккельса в резонаторе, обеспечивающей модуляцию добротности. При формировании такого одиночного импульса, вообще говоря, может появиться достаточно большой джиттер, который мы обозначим J_1 . Это первая причина плохой синхронизации лазеров.

Вырезанный одиночный импульс управляет ячейкой Поккельса. Он попадает на блок питания ячейки, который, в свою очередь, подает перепад высокого напряжения непосредственно на кристалл ЭОЗ. Джиттер между управляющим импульсом и импульсом высокого напряжения является второй причиной плохой синхронизации лазеров – джиттера, который мы обозначим J_2 . Благодаря малоинерционности эффекта Поккельса джиттером между высоковольтным импульсом и моментом переключения оптических потерь в резонаторе можно пренебречь. Суммарный джиттер $J_1 + J_2$, вносимый формирователем управляющего импульса и блоком питания ячейки Поккельса, при помощи методов современной радиоэлектроники может быть уменьшен до 100 пс (см. разд.3).

Наибольшую проблему создает третья причина плохой синхронизации лазеров – джиттер между моментом переключения добротности резонатора и гигантским импульсом, который мы обозначим J_Q . Если в момент переключения добротности порог генерации не превышен, то генерация начинается со спонтанных шумов. Это приводит к принципиально неустраняемому джиттеру, который в несколько раз больше времени обхода резонатора. Если порог генерации превышен еще до переключения добротности и в момент переключения в резонаторе находится излучение импульса свободной генерации, то джиттер J_Q будет существенно меньше – десятые доли времени обхода резонатора. Таким образом, для обеспечения джиттера в 100 пс оптическая длина полного обхода резонатора должна быть порядка 10 см, т. е. расстояние между зеркалами не должно превышать 3–4 см. Создание такого лазера весьма затруднительно, а с использованием ламповой накачки – невозможно в принципе.

Идея предлагаемого метода синхронизации заключается в использовании следующей двухступенчатой схемы формирования короткого лазерного импульса. Время обхода резонатора с модуляцией добротности выбирается равным 3–4 нс, что обеспечивает генерацию гигантского импульса с длительностью 10–15 нс и джиттером $J_Q \sim 1$ нс. Далее с помощью внрезонаторной ячейки Поккельса из этого импульса вырезается импульс необходимой длительности (1–3 нс). Управляется эта ячейка тем же импульсом, что и внутррезонаторная ячейка Поккельса, только задержанным на необходимое время. Как будет показано ниже, джиттер вырезанного лазерного импульса относительно управляющего может быть сделан гораздо меньше J_Q .

Наиболее эффективным способом вырезания короткого импульса нам представляется использование внрезонаторной ячейки Поккельса, управляемой полуволновым напряжением, в четвертьволновой геометрии (рис.2). До прихода управляющего импульса напряжение на кри-

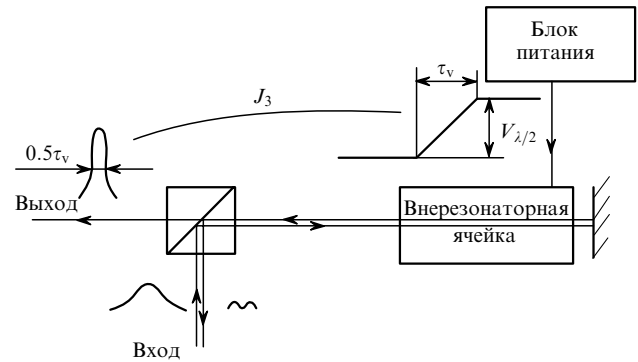


Рис.2. Схема вырезания короткого импульса при помощи внрезонаторной ячейки Поккельса.

сталле равно нулю. Кристалл является изотропной средой, коэффициент пропускания T которой со входа на выход равен нулю. После установления полуволнового напряжения кристалл представляет собой пластинку $\lambda/2$ и, следовательно, ее коэффициент пропускания T также равен нулю. Во время перепада напряжения от нуля до полуволнового коэффициент пропускания сначала увеличивается до единицы (момент времени, когда напряжение равно четвертьволновому), а затем снова уменьшается до нуля. Это позволяет при помощи одного перепада напряжения длительностью τ_v сформировать оптический импульс, длительность которого по полувысоте равна примерно $0.5\tau_v$.

Оценим влияние джиттера гигантского импульса J_Q на джиттер J_3 вырезанного импульса относительно перепада высокого напряжения на внрезонаторной ячейке Поккельса. Пусть перепад напряжения от нуля до полуволнового происходит линейно за время от $-\tau_v/2$ до $+\tau_v/2$, а гигантский импульс длительностью τ_0 имеет гауссову форму, причем максимум импульса не совпадает с моментом времени $t = 0$ на величину J_Q . Тогда интенсивность вырезанного импульса будет определяться выражением

$$I_{\text{out}} = I_{\text{input}} T = \begin{cases} I_0 \exp \left[-\frac{(t - J_Q)^2}{\tau_0^2} \right] \cos^2 \left(\frac{\pi t}{\tau_v} \right), & |t| < \frac{\tau_v}{2}, \\ 0, & |t| \geq \frac{\tau_v}{2}. \end{cases}$$

Поскольку $J_Q \neq 0$, момент времени t^* , в который вырезанный импульс $I_{\text{out}}(t)$ будет иметь максимум, также не равен нулю. Будем считать, что джиттер вырезанного импульса $J_3 = |t^*|$. Дифференцируя I_{out} по времени и приравнявая производную нулю, получаем уравнение для J_3 :

$$\tan \frac{\pi J_3}{\tau_v} = (J_Q - J_3) \frac{\tau_v}{\pi^2 \tau_0^2}.$$

Учитывая, что $J_3 \ll \tau_v/\pi \ll \tau_0$, имеем

$$J_3 = \frac{\tau_v^2}{\pi^2 \tau_0^2} J_Q. \quad (1)$$

Из этой формулы видно, что $J_3 \ll J_Q$, т. е. джиттер J_3 между вырезанным лазерным импульсом и перепадом напряжения на внрезонаторной ячейке Поккельса существенно меньше, чем джиттер J_Q между гигантским им-

пульсом и перепадом напряжения на внутриврезонаторной ячейке Поккельса. Поскольку $J_Q \approx 1$ нс, а $\tau_v \ll \pi\tau_0$, то необходимое условие $J_3 \leq 100$ пс будет удовлетворено.

Таким образом, в предложенной схеме синхронизации импульсов двух лазеров суммарный джиттер J между ними может быть оценен по формуле

$$J = J_1 + J_2 + J_3$$

и вполне может составлять менее 100 пс, что и было реализовано нами в эксперименте.

3. Экспериментальные результаты

Общая схема эксперимента представлена на рис.3. Временная диаграмма оптических и электрических импульсов и их джиттеров относительно импульсов непрерывного лазера с синхронизацией мод показана на рис.4.

Лазер с синхронизацией мод представлял собой непрерывный лазер на кристалле Cr:форстерита (производство фирмы «Авеста»). Синхронизация мод осуществлялась при помощи керровской линзы. Для накачки использовался непрерывный волоконный лазер на ионах Yb мощностью 8 Вт (производство НТО «ИРЭ – Полюс»). Длительность импульсов составляла 34 фс при ширине спектра 50 нм, частота следования импульсов равнялась 76 МГц, средняя мощность – 270 мВт. Незначительная доля излучения лазера (рис.4,а) направлялась на фотодиод ФД1, который формировал последовательность импульсов напряжения длительностью около 1 нс (рис.4,б).

Лазер с модуляцией добротности был собран на кристалле Nd:YLF диаметром 5 мм с длиной освещаемой части 75 мм. Кристалл был вырезан под углом 5° к оп-

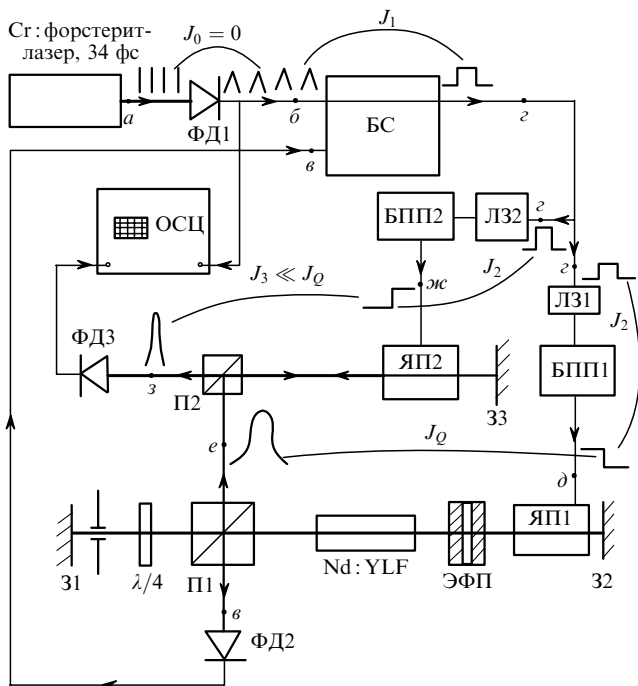


Рис.3. Схема эксперимента (жирными линиями показан лазерный пучок, тонкими – электрические соединения, буквы а–з соответствуют временным диаграммам на рис.4): ФД – фотодиод; БС – блок синхронизации; БПП – блок питания ячейки Поккельса; ЯП – ячейка Поккельса; З – зеркало; П – поляризатор; ЭФП – эталон Фабри – Перо; ЛЗ – линия задержки.

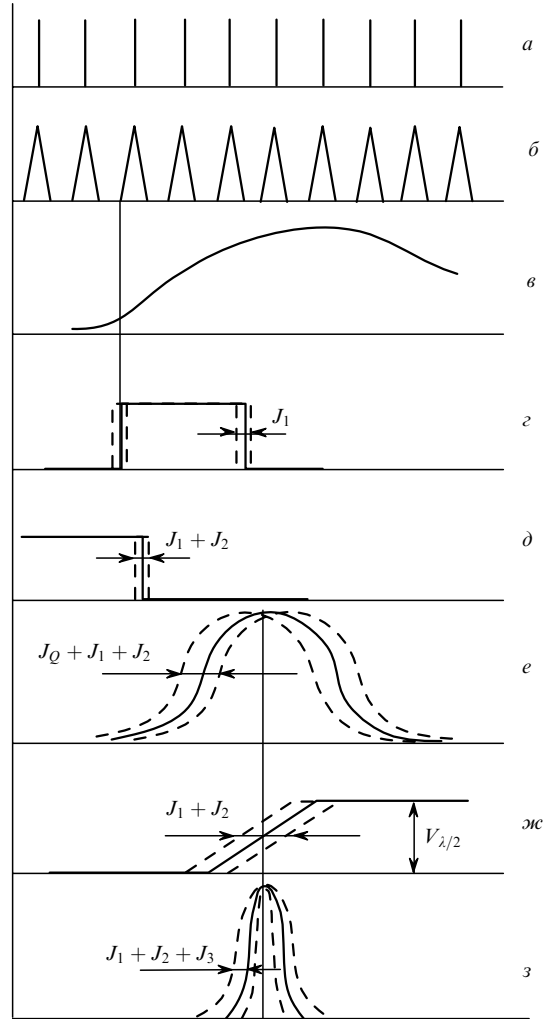


Рис.4. Временные диаграммы импульсов в точках а–з на рис.3.

тической оси. Это обеспечивает эффективную генерацию на длине волны 1053 нм, преимущественное усиление одной поляризации [9] и достаточно сильное двулучепреломление, необходимое для подавления термонаведенного двулучепреломления и вызванной им деполаризации [10]. Накачка осуществлялась двумя лампами с электрической энергией 60 Дж при длительности импульса 200 мкс и частоте следования 2 Гц. Мы использовали линейный резонатор длиной 0.5 м с коэффициентом отражения обоих зеркал 31,2 99.6%. Поляризатор П1 и пластинка λ/4 обеспечивали поляризационный вывод излучения. Селекция поперечных мод осуществлялась диафрагмой диаметром 1.7 мм.

Для селекции продольных мод использовался эталон Фабри – Перо ЭФП толщиной 15 мм с коэффициентом отражения каждого зеркала 70%. Эталон располагался под углом к оси резонатора, чтобы исключить паразитную генерацию между зеркалом 31 и зеркалами эталона. Появление импульса с двумя продольными модами фиксировалась специальным датчиком (на рис.3 не показан), анализирующим наличие межмодовых биений в гигантском импульсе. Вероятность появления двухмодового импульса не превышала 0.1%.

Внутриврезонаторная ячейка Поккельса ЯП1 на основе кристалла DKDP имела длину 20 мм. На кристалл подавалось постоянное напряжение (рис.4,д), обеспечи-

вающее такое уменьшение добротности, что порог генерации достигался в момент максимума инверсии. В результате излучался импульс свободной генерации длительностью 200 нс (рис.4,б). Этот импульс попадал на фотодиод ФД2, сигнал с которого направлялся на блок синхронизации БС, формирующий управляющий импульс (рис.4,з). Последний через линии задержки ЛЗ1,2 подавался на запуск блоков питания ячеек Поккельса БПП1,2. Джиттер, вносимый линиями задержки, был пренебрежимо мал. Напряжение питания на внутррезонаторной ячейке Поккельса ЯП1 сбрасывалось до нуля, (рис.4,д) что приводило к генерации гигантского импульса (рис.4,е) с длительностью по полувысоте 15 нс ($t_0 = 9$ нс) и энергией 8 мДж. Джиттер гигантского импульса относительно перепада высокого напряжения J_Q был менее 1 нс при времени наблюдения 15 мин. Заметим, что при таком включении модуляции добротности селекция мод (и продольных, и поперечных) осуществляется во время формирования импульса свободной генерации. Это приводит к существенно лучшей селекции мод благодаря большому числу обходов резонатора (см. также [8]).

Ключевым элементом всей системы является блок синхронизации. Он осуществляет генерацию управляющего импульса (рис.4,з), синхронизованного с фронтом одного из импульсов с частотой следования 76 МГц (рис.4,б) при наличии на его втором входе импульса с фотодиода ФД2, инициированного излучением свободной генерации (рис.4,а). Основу блока синхронизации представляет двухступенчатый D-триггер, в котором используются эмиттерно-связанные быстродействующие элементы, способные работать на частотах до 450 МГц, с малым (единицы наносекунд) временем отклика. Джиттер J_1 между импульсами на рис.4,б и з определялся в основном внутренним джиттером эмиттерно-связанной логики и не превышал 30 пс. Подробно схема и работа блока синхронизации описаны в [11].

Во внрезонаторной ячейке Поккельса ЯП2 (рис.3) также использовался кристалл DKDP длиной 20 мм. Эта ячейка была установлена в описанной выше четвертьволновой геометрии, поэтому полуволновой перепад напряжения (рис.4,ж) длительностью $\tau_v \approx 4$ нс обеспечивал длительность вырезанного импульса 2.3 нс по полувысоте. Момент времени, когда пропускание этой ячейки максимально (напряжение равно четвертьволновому) совмещался (см. рис.4,е–з) с максимумом гигантского импульса при помощи линии задержки ЛЗ1. Энергия вырезанного импульса составляла около 1 мДж.

На рис.5 приведены осциллограммы гигантского, вырезанного и холостого (отраженного поляризатором П2 в сторону резонатора) импульсов. Из рис.5,б видно, что во внрезонаторной ячейке Поккельса ЯП2 существуют переколебания напряжения, приводящие к появлению второго максимума (сателлита) в интенсивности вырезанного импульса. Амплитуда этого сателлита существенно зависит от длительности перепада высокого напряжения τ_v : чем быстрее происходит перепад, тем больше амплитуда сателлита. Однако увеличение τ_v приводит к пропорциональному увеличению длительности вырезанного импульса. Задерживая импульс высокого напряжения относительно его оптимального положения на некоторое время t_d , также можно уменьшить амплитуду сателлита. Заметим, что это не приводит к увеличению джиттера J_3 ; легко показать, что выражение (1) остается

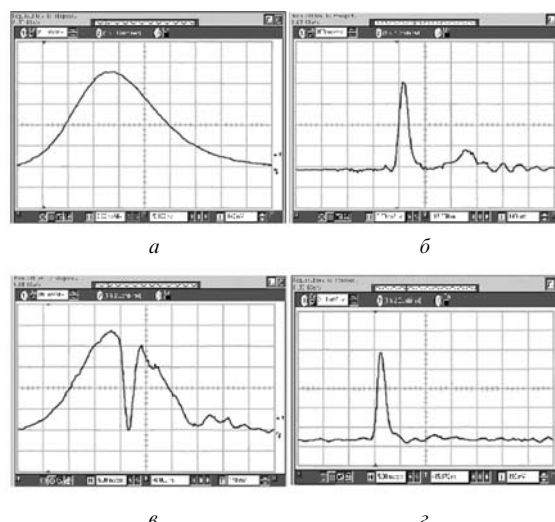


Рис.5. Осциллограммы гигантского импульса (а), вырезанного импульса (б), холостого (отраженного поляризатором П2 в сторону резонатора) импульса (в) и вырезанного импульса после его усиления до 1.2 Дж в Nd:YLF-усилителях (г). Развертка – 5 нс/дел. по горизонтали.

справедливым при любом времени t_d . Важно также отметить, что при последующем усилении вырезанного импульса в лазерных усилителях в режиме насыщения амплитуда сателлита будет усиливаться существенно меньше амплитуды основного импульса (рис.5,г).

В эксперименте мы измеряли джиттер между двумя лазерами при помощи цифрового осциллографа Infiniium (1.5 ГГц) фирмы Agilent Technology. На два входа этого осциллографа подавались импульсы с фотодиодов ФД1 и ФД3. Осциллограф автоматически определял средний за одну минуту интервал времени τ между передними фронтами этих импульсов и его среднеквадратичное отклонение – суммарный джиттер J .

Зависимость J от времени с момента включения системы синхронизации приведена на рис.6. Видно, что в среднем джиттер между двумя лазерами составил около 50 пс. Заметим, что в процессе непрерывной работы обоих лазеров время τ изменялось очень медленно: за 30 минут τ увеличилось всего на 50 пс. Столь медленное расплывание импульсов легко компенсировалось при помощи линий задержки.

4. Заключение

Приведенные экспериментальные результаты показывают, что предложенная двухступенчатая схема синх-

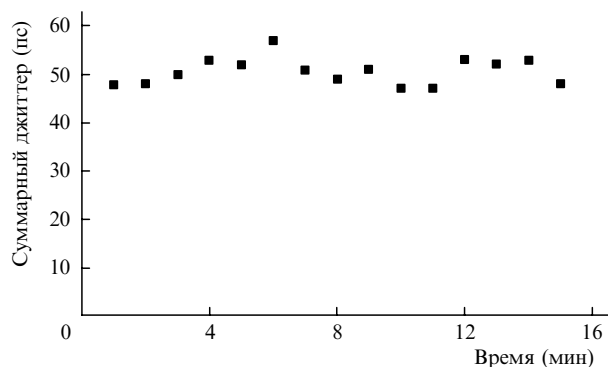


Рис.6. Зависимость суммарного джиттера J между двумя лазерами от времени.

ронизации лазера с модуляцией добротности и непрерывного лазера с пассивной синхронизацией мод позволяет достаточно просто и надежно синхронизировать эти лазеры с точностью 50 пс. Для дальнейшего уменьшения джиттера следует термостабилизировать электронные схемы, уменьшить разброс параметров лавинных транзисторов, используемых в блоке питания внрезонаторной ячейки Поккельса, и стабилизировать накачку лазера с модуляцией добротности (например, используя диодную накачку вместо ламповой).

Описанная система синхронизации применялась для параметрического усиления чирпованных импульсов лазера на Cr:форстерите. Излучение лазера на Nd:YLF усиливалось в двух каскадах до энергии 2 Дж, преобразовывалось во вторую гармонику и использовалось для накачки параметрического усилителя. Результаты проведенных экспериментов готовятся к печати.

1. Dubietis A., Jonusauskas G., Piskarskas A. *Opt. Comm.*, **88**, 437 (1992).
2. Ross I.N., Matousek P., Towrie M., Langley A.J., Collier J.L. *Opt. Comm.*, **144**, 125 (1997).
3. Matousek P., Rus B., Ross I.N. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36**, 158 (2000).
4. Jovanovic I., Ebberts C.A., Stuart B.C., Hermann M.R., Morse E.C. In: *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). OSA Trends in Optics and Photonics* (Washington, DC.: OSA, 2002, p. 387).
5. Freidman G., Andreev N., Ginzburg V., Katin E., Khazanov E., Lozhkarev V., Palashov O., Sergeev A., Yakovlev I. In: *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). OSA Trends in Optics and Photonics* (Washington, DC.: OSA, 2002, p. CPDA9-1).
6. Запороженко А.В., Тылец Н.А. *Квантовая электроника*, **23**, 527 (1996).
7. Koechner W. *Solid-State Laser Engineering* (Berlin, Geidelberg, New York, Barselona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Singapore: Springer, 1999).
8. Andreev N., Khazanov E., Palashov O. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3267**, 264 (1998).
9. Дьякова А.Ф., Корнев А.Ф., Рейтеров В.М., Сомс Л.Н., Ступников В.К., Ткачук А.М., Ушакова О.А. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **55**, 294 (1991).
10. Мезенов А.В., Сомс Л.Н., Степанов А.И. *Термооптика твердотельных лазеров* (Л.: Машиностроение, 1986).
11. Khazanov E., Anastasiev A., Katin E., Palashov O. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4629**, 144 (2002).