

# ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

УДК 681.7.069.24

## КОМПАКТНЫЙ ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ГЕНЕРАТОР НА КРИСТАЛЛЕ Yb:KYW С ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

© 2010 г. **Г. Н. Kim\***, Ph.D; **U. Kang\***, Ph.D; **D. Heo\***, Ph.D; **В. Е. Яшин\*\***, доктор физ.-мат. наук; **А. В. Кулик\*\*\***; **Е. Г. Салль\*\*\***; **С. А. Чижов\*\*\***

\* SOI-Korea Center, KERI, Ansan, Korea

\*\* НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

\*\*\* ОАО “ТКС-Оптика”, Санкт-Петербург

E-mail: vyashin@yandex.ru

Описывается фемтосекундный лазер на Yb:KYW с прямой накачкой полупроводниковым инжекционным лазером. Лазерный кристалл Yb:KYW накачивался продольно излучением полупроводникового инжекционного InGaAs-лазера с волоконным выводом излучения. Пространственная структура излучения полупроводникового лазера переформировывалась линзовой оптической системой с целью максимальной концентрации его мощности в объеме лазерной среды. Генерация фемтосекундных импульсов производилась в режиме самосинхронизации продольных мод путем использования полупроводникового насыщающегося поглотителя. Средняя мощность генератора превышала 1 Вт на центральной длине волны 1043 нм при длительности импульсов около 90 фс. Разработанный задающий генератор может использоваться и как самостоятельный источник фемтосекундных световых импульсов, и в качестве затравочного источника для фемтосекундных лазерных усилительных систем.

**Ключевые слова:** фемтосекундный генератор, фемтосекундные импульсы, длительность импульса, диодный лазер, Yb:KYW-активный элемент.

Коды OCIS: 140.3480, 140.7090.

Поступила в редакцию 27.08.2009.

### Введение

Ультракороткие лазерные импульсы (УКИ) обладают такими замечательными особенностями, как высокая пиковая мощность и большая ширина спектра [1]. Благодаря этим и другим достоинствам излучения лазерные системы с ультракороткой длительностью импульса находят широкое применение в таких областях, как микрообработка различных материалов, нелинейная оптика, генерация терагерцового излучения, медицинская томография, химия, биология и др. [2, 3]. Например, в области лазерных технологий благодаря высокой интенсивности и короткой длительности пико- и фемтосекундных импульсов можно проводить прецизионную обработку сверхтвердых материалов, поскольку УКИ минимизируют термодиффузию и остаточные разрушения зоны обработки [4]. Высокая пиковая мощность УКИ позволяет

формировать различные наноструктуры даже в прозрачных материалах, таких, например, как полимеры, подбирая энергию импульсов таким образом, чтобы порог разрушения достигался только в максимумах распределения интенсивности [5].

Для практического применения фемтосекундных лазеров необходимо, чтобы они были достаточно компактными и стабильными. Эти условия в наибольшей степени достигаются при использовании лазерных сред, допускающих прямую накачку излучением полупроводниковых инжекционных лазеров, которая более компактна, надежна и дешева по сравнению с накачкой твердотельными лазерами. Стабильность фемтосекундных лазерных систем с прямой лазерной диодной накачкой можно также повысить, размещая лазерные диоды как можно ближе к лазерному кристаллу и накачивая усилители [6], часто входящие в состав лазер-

ных систем, не в импульсном, а в непрерывном режиме.

В качестве материалов для лазеров с прямой диодной накачкой привлекательными являются кристаллы, активированные иттербием [7, 8], поскольку они имеют широкую полосу люминесценции для генерации фемтосекундных импульсов с длительностью меньше 500 фс. Благодаря простой квазитрехуровневой структуре этих кристаллов [9, 10] они подходят для накачки хорошо отработанными полупроводниковыми инжекционными InGaAs-лазерами на длинах волн вблизи 980 или 940 нм. Малый стоксов сдвиг (примерно  $600\text{ см}^{-1}$ ) между длинами волн поглощения и излучения уменьшает тепловыделение (при условии высокого энергосъема) и позволяет в принципе увеличить эффективность по сравнению, например, с лазерными средами, активированными неодимом.

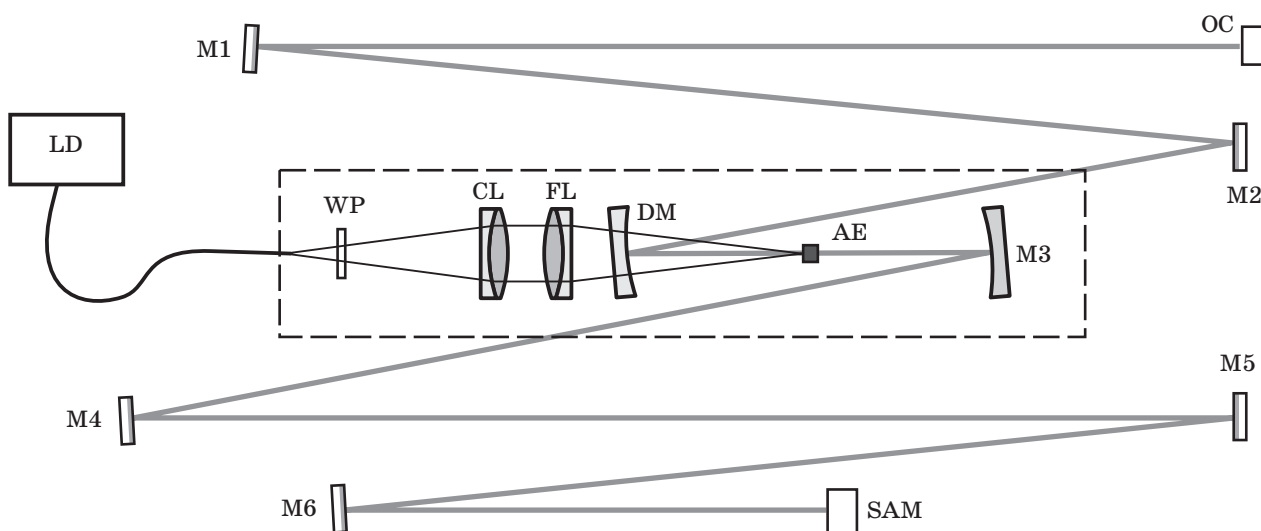
Другим преимуществом иттербия перед неодимом является более широкая полоса люминесценции лазерных материалов, а значит, и возможность генерации более коротких импульсов. Среди сред, активированных иттербием, калиевые вольфраматы являются одними из наиболее перспективных из-за их больших поперечных сечений поглощения и вынужденного излучения, широкой полосы люминесценции и хорошей теплопроводности [10]. Кроме того, положение центральной длины волны люминесценции кристаллов Yb:KGW и Yb:KYW делает

их перспективными затравочными источниками фемтосекундных импульсов для усилителей, работающих на длинах волн вблизи 1 мкм (Yb:KGW, Yb-стекло, Nd-стекло, Yb:YAG и др.) [7]. В силу этих достоинств с использованием кристаллов Yb:KYW или Yb:KGW уже реализованы генераторы со средней мощностью более 10 Вт [11, 12], однако длительность импульса в таких мощных лазерах достаточно велика (обычно более 400 фс). Лазеры на Yb:KYW/Yb:KGW с более короткой длительностью (менее 200 фс) имеют, как правило, и меньшую мощность (менее 1 Вт) [13, 14].

В данной статье описывается компактный фемтосекундный задающий генератор с прямой продольной накачкой кристалла Yb:KYW высокояркостными полупроводниковыми инжекционными InGaAs-лазерами с волоконным выходом. Использование такой накачки, а также chirпированных зеркал для компенсации внутрирезонаторной дисперсии позволило увеличить выходную мощность генератора более чем до 1 Вт при длительности импульса 90 фс и сделать его более компактным по сравнению с вариантом, представленным нами ранее [15].

### Экспериментальная установка

Оптическая схема лазера показана на рис. 1. В качестве активной среды использовался кристалл Yb:KYW толщиной 3 мм. Кристалл со-



**Рис. 1.** Оптическая схема лазера с прямой накачкой излучением полупроводниковых инжекционных лазеров. LD – лазерный диод компании “IPG Photonics” с волоконным выводом излучения, WP – полуволновая пластинка, CL – коллимирующая линза, FL – фокусирующая линза, AE – активный элемент из кристалла Yb:KYW, DM – дихроичное сферическое зеркало, M1–M6 – зеркала резонатора, OC – выходное зеркало, SAM – насыщающееся полупроводниковое зеркало.

держал 5 ат.% ионов  $\text{Yb}^{3+}$  (примерно  $7,6 \times 10^{20} \text{ Yb}^{3+} \text{ ат/см}^3$ ) и был вырезан таким образом, чтобы излучение накачки распространялось вдоль кристаллографической оси  $b$ . Вектор поляризации накачки был параллелен оси  $a$ , что обеспечивало максимальный коэффициент поглощения. Исследовались две конфигурации лазерного кристалла. В одной из них лазерный кристалл размером  $3 \times 3 \times 3$  мм располагался под углом Брюстера по отношению как к излучению накачки, так и к генерируемому излучению. В другой конфигурации лазерный кристалл был такого же размера и представлял собой пластину с просветленными как для излучения накачки, так и для излучения генерации торцами. В этом случае, как показывает расчет, плотность мощности накачки примерно в 2 раза превышает плотность мощности накачки для кристалла с брьюстеровскими торцами.

Для уменьшения размеров резонатора его схема была сложена в пространстве с использованием плоских высокоотражающих диэлектрических зеркал. Кристалл был помещен между двумя вогнутыми дихроичными зеркалами с радиусами кривизны  $R = 100$  мм. Для согласования размеров пучка накачки и моды резонатора кристалл был смещен в продольном направлении относительно центра каустики пучка в резонаторе.

Для накачки лазерного кристалла использовалось излучение 8-ваттного лазерного диода фирмы “IPG Photonics” с волоконным выходом диаметром 105 мкм и числовой апертурой 0,11. Для сохранения линейной выходной поляризации (на уровне 7% деполяризации) первоначальная длина волокна (1 м) уменьшалась до 10 см. Лазерный диод размещался на термоэлектрическом элементе (элемент Пелтье), который в свою очередь охлаждался водой. Такая конструкция позволяла осуществлять подстройку температуры лазерного диода с целью смещения его длины волны на максимум поглощения в лазерном кристалле. В нашем случае оптимальная температура составляла  $36,5^\circ\text{C}$ . При этом максимальная поглощенная мощность составляла около 5,5 Вт. Излучение накачки с выхода волокна коллимировалось ахроматическим дублетом с фокусным расстоянием  $F = 60$  мм и через дихроичное зеркало (пропускание 95%) фокусировалось в объем лазерного кристалла другим ахроматическим дублетом с фокусным расстоянием  $F = 60$  мм, что обеспечивало поперечный размер пучка около 100 мкм. Согласование поперечного размера зоны накачки и размера моды резонатора, как уже отмеча-

лось, осуществлялось продольным смещением кристалла вдоль оптической оси. Для согласования поляризации падающего излучения накачки с осью максимального поглощения кристалла в схему вводилась полуволновая пластинка.

Как хорошо известно [1], для генерации импульсов длительностью менее 1 пс в резонаторе фемтосекундных лазеров необходимо компенсировать дисперсию в лазерном активном элементе. В настоящее время для такой компенсации используются два устройства – призменные линии задержки и (или) чирпированные зеркала. Чирпированные зеркала делают схему более компактной, поскольку величина компенсации дисперсии не зависит от расстояния между зеркалами, а определяется только дисперсией, вносимой самими зеркалами. Поэтому в генераторе мы использовали два чирпированных зеркала фирмы “Layertec” с общей дисперсией групповых скоростей на один проход  $\text{GVD} = -1350 \text{ фс}^2$ .

Выходное зеркало с пропусканием 4% размещалось в левом плече резонатора. Во втором плече резонатора излучение генерации фокусировалось вогнутым зеркалом с радиусом кривизны  $R = 300$  мм на зеркало, содержащее насыщающийся полупроводниковый поглотитель (SAM). Радиус кривизны этого зеркала подбирался таким образом, чтобы обеспечить на SAM интенсивность излучения, превышающую интенсивность насыщения поглотителя. При оптимизации параметров лазера мы использовали насыщающиеся поглотители фирмы “Bator GmbH” с начальным поглощением  $A_0$  от 0,7 до 4%. Все элементы лазера располагались в корпусе размером  $424 \times 190 \times 82$  мм.

Для регистрации цуга сверхкоротких импульсов использовались быстрый фотодиод и широкополосный осциллограф WavePro 7100A LeCroy (ширина полосы пропускания 1 ГГц). Длительность импульсов измерялась с помощью автокоррелятора второго порядка PulseCheck [15] компании “PulseCheck” и спектрального автокорреляционного устройства фирмы “Swamp Optics”, использующего методику FROG [16]. Одновременно с помощью спектрометра фирмы “Ocean Optics” с компьютерным интерфейсом регистрировался также спектр излучения. Средняя мощность излучения измерялась приемником компании “Ophir”, а пространственный профиль пучка регистрировался ПЗС-камерой USBeamPro компании “Photon Inc”.

## Результаты и их обсуждение

В начале исследований нами была получена генерация в непрерывном режиме для прямоугольного активного элемента, когда насыщающийся поглотитель SAM был заменен обычным высокоотражающим интерференционным зеркалом. Зависимость выходной средней мощности от мощности лазерного диода для активного элемента прямоугольной формы и выходного зеркала резонатора с коэффициентом отражения 4% приведена на рис. 2. Максимальная средняя мощность достигала 1,65 Вт, а дифференциальная эффективность по отношению к мощности поглощенного излучения – 44%. Эксперименты, проведенные с Брюстеровским активным элементом (рис. 2), показали, что максимальная выходная мощность была примерно в 2,5 раза ниже (0,67 Вт), что является следствием более низкой плотности мощности накачки в активном элементе. Спектр непрерывной генерации шириной около 0,8 нм центрировался на длине волны 1038 нм.

Для перехода в режим генерации УКИ в качестве “глухого” зеркала использовались зеркала с нанесенным на них SAM от компании “Bator”. Как показали эксперименты, наиболее стабильная работа лазера с исключением неустойчивости, связанной с модуляцией добротности [17], наблюдалась с модулятором, имеющим начальное поглощение  $A_0 > 2\%$ . Это иллюстрируется осциллограммой цуга импульсов, приведенной на рис. 3.

Средняя мощность излучения в этом режиме составляла 700–1100 мВт для прямоугольного активного элемента при частоте следования импульсов 87,8 МГц, что дает энергию одиночного фемтосекундного импульса более 10 нДж. На рис. 4 показаны автокорреляционная функция импульса (а) и спектр 90 фс-лазерных импульсов (б). Как видно, генерация происходила на центральной длине волны 1043 нм, ширина частотной полосы была равна 14,5 нм по уровню половины интенсивности. Произведение ширины спектра и длительности импульса примерно в 1,1 раза превышает предел для импульсов с профилем интенсивности, описываемой  $\text{sech}^2$ -функцией [1].

Вид выходного пучка на расстоянии 20 см от выходного зеркала и соответствующие профили интенсивности приведены на рис. 5. Видно, что сечение гауссового пучка представляет собой эллипс с осями 0,273 и 0,241 мм. Было также измерено качество выходного пучка, характери-

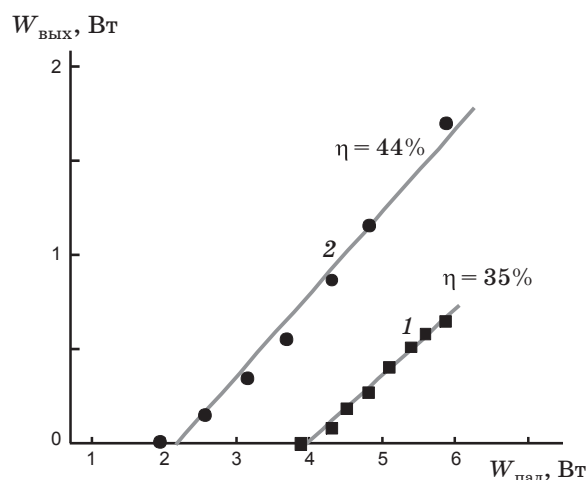


Рис. 2. Зависимости выходной мощности лазера в непрерывном режиме ( $W_{\text{вых}}$ ) от мощности излучения накачки, падающего на лазерный кристалл ( $W_{\text{пад}}$ ).  $\eta$  – дифференциальная эффективность лазера по отношению к мощности  $W_{\text{пад}}$ . 1 – при падении под углом Брюстера, 2 – при нормальном падении.

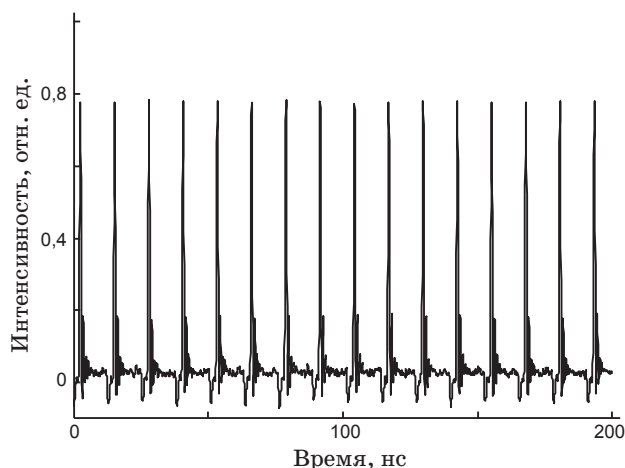


Рис. 3. Осциллограмма последовательности импульсов генератора при использовании SAM с начальным поглощением 4%.

зуемое параметром  $M^2$  [18]. Этот параметр рассчитывался при измерении эволюции диаметра лазерного пучка при его распространении и для двух взаимно перпендикулярных направлений составил  $M_x^2 = 1,1$  и  $M_y^2 = 1,25$ , что достаточно близко к  $M^2 = 1$  для идеального гауссова пучка. Небольшая астигматичность пучка с соотношением осей эллипса около 1,14 связана с наклоном сферических дихроичных зеркал. Отметим, что при использовании активного элемента с Брюстеровскими торцами эта абберрация компенсировалась аналогичной абберрацией в активном элементе.

Мы также провели измерения стабильности выходной мощности лазера при его непрерыв-

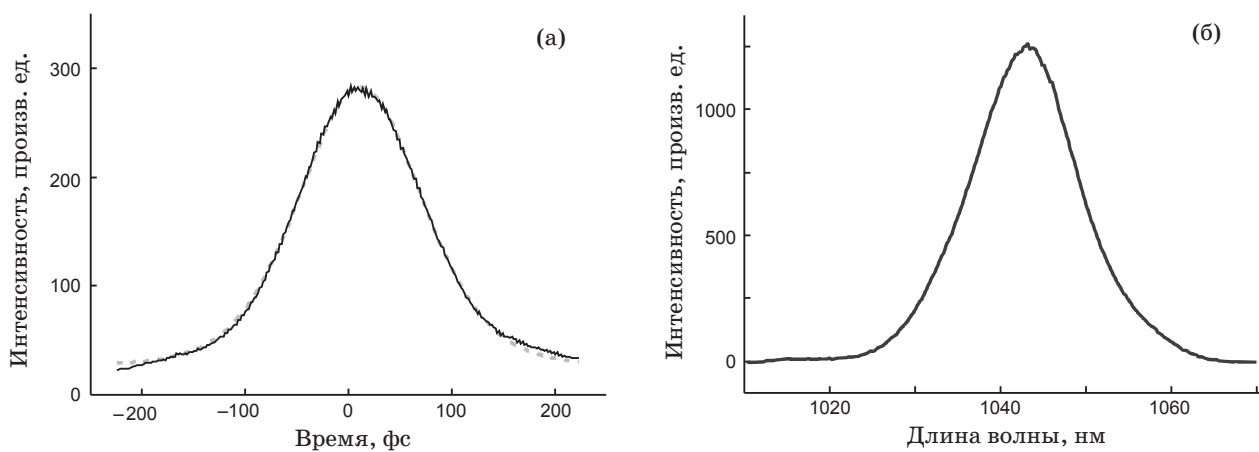


Рис. 4. Автокорреляционная функция импульса (а) и спектр (б) на выходе лазера с прямоугольным активным элементом при выходной мощности 700 мВт. Ширина автокорреляционной функции по полувысоте 140,6 фс, длительность импульса по полувысоте 91,4 фс в предположении  $\text{sech}^2$ -аппроксимации.

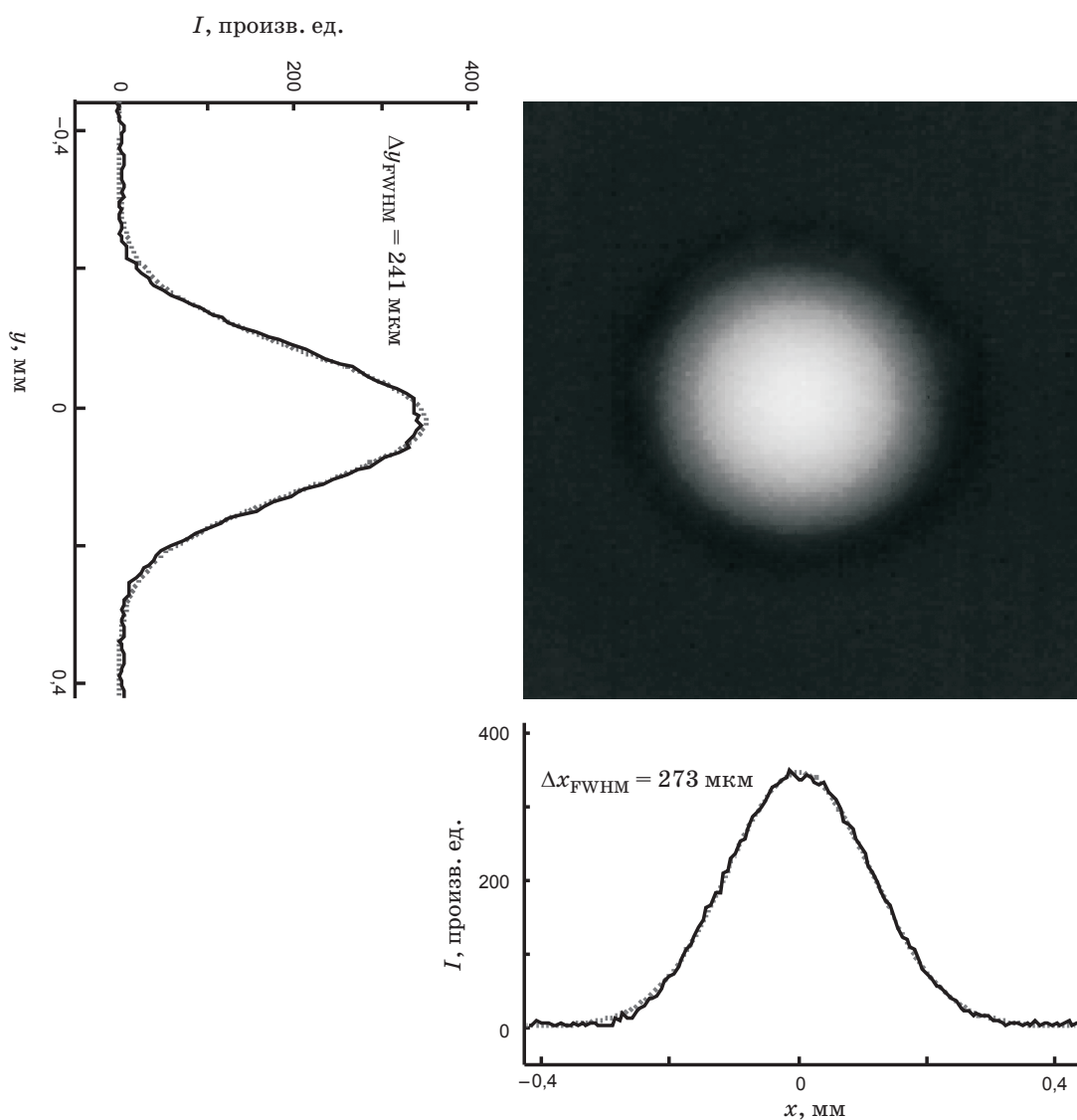


Рис. 5. Пространственная структура пучка и соответствующие профили интенсивности ( $I$ ) на выходе лазера.



ной работе. Эти измерения показали, что мощность лазера была стабильна в пределах  $\pm 0,2\%$  в течение 2 ч после выхода на режим в течение примерно 30 мин. Стабильность направления генерации, измеренная с помощью CCD-камеры, находилась в пределах 1–2% по отношению к дифракционной расходимости выходного пучка лазера.

При замене прямоугольного активного элемента на элемент с Брюстеровскими торцами также была получена генерация в режиме самосинхронизации мод. Средняя мощность генерации не превышала 300 мВт, что связано с меньшей плотностью мощности накачки. Ширина спектра находилась на уровне 8–9 нм, что в 1,5 раза меньше ширины спектра для прямоугольного элемента, а сам спектр центрировался на длине волны 1038 нм. Эти параметры существенно уступают параметрам лазера с прямоугольным активным элементом, который и можно рекомендовать для окончательного использования.

### Заключение

Таким образом, был разработан фемтосекундный генератор на кристалле Yb:KYW с прямой накачкой излучением лазерного диода с волоконным выводом излучения накачки. Он позволяет генерировать непрерывную последовательность оптических импульсов длительностью 100 фс на частоте 87,8 МГц со средней мощностью излучения более 1 Вт. Производство длительности импульса и ширины спектра близко к теоретическому пределу, что указывает на отсутствие частотной модуляции. Полученные параметры генератора позволяют использовать его как в качестве затравочного источника фемтосекундных импульсов для многопроходовых или регенеративных усилителей с прямой диодной накачкой, так и самостоятельно, например для генерации терагерцового излучения или микромодификации вещества.

В заключение авторы выражают благодарность Корейскому фонду международного сотрудничества в области науки и технологий (KICOS) за поддержку работы через грант Корейского министерства образования, науки и технологии (MEST) № K20501000003.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Diels J.-C., Rudolph W.* Ultrashort laser pulse phenomena: fundamentals, techniques, and applications

on femtosecond time scale. Boston: Academic Press, 2006. 652 p.

2. *Fermann M.E., Galvanauskas A., Sucha G.* Ultrafast lasers: technology and applications. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. 783 p.
3. *Dausinger F., Lichtner F., Lubatschowski.* Femtosecond technology for technical and medical applications. Berlin: Springer, 2004. 326 p.
4. *Luft A., Franz U., Emsermann A., Kaspar J.* A study of thermal and mechanical effects on materials induced by pulsed laser drilling // *Appl. Phys. A.* 1996. V. 63. P. 93–101.
5. *Kawata S., Sun H.-B., Tanaka T., Takada K.* Finer features for functional microdevices // *Nature.* 2001. V. 412. P. 697–698.
6. *Strickland D., Mourou G.* Compression of amplified chirped optical pulses // *Opt. Comm.* 1985. V. 56. P. 219–221.
7. *Honninger C., Paschotta R., Graf M., Morier-Genoud F., Zhang G., Moser M., Biswal S., Nees J., Braun A., Mourou G., Johannsen I., Giesen A., Seiber W., Keller U.* Ultrafast ytterbium-doped bulk lasers and laser amplifiers // *Appl. Phys. B.* 1999. V. 69. P. 3–17.
8. *Krupke W.* Ytterbium Solid-state Lasers-the First Decade // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2000. V. 6. P. 1287–1296.
9. *Kuleshov N.V., Lagatsky A.A., Podlipensky A.V., Mikhailov V.P., Huber G.* Pulsed laser operation of Yb-doped KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> and KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> // *Opt. Lett.* 1997. V. 22. P. 1317–1319.
10. *Kuleshov N.V., Lagatsky A.A., Shcherbitsky V.G., Mikhailov V.P., Heumann E., Jensen T., Diening A., Huber G.* CW Laser Performance of Yb and Er, Yb Doped Tungstates // *Appl. Phys. B.* 1997. V. 64. P. 409–411.
11. *Major A., Cisek R., Barzda V.* Femtosecond Yb:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser oscillator pumped by a high power fiber-coupled diode laser module // *Optics Express.* 2006. V. 14. № 25. P. 12163–12166.
12. *Calendron A.L., Wentsch, Lederer M.J.* High power cw and mode-locked oscillators based on Yb:KYW multi-crystal resonators // *Optics Express.* 2008. V. 18. P. 18838–18841.
13. *Paunescu G., Hein J., Sauerbrey R.* 100 fs diode-pumped Yb:KGW mode-locked laser // *Appl. Phys. B.* 2004. V. 79. P. 555–558.
14. *Lagatsky A.A., Brown C.T.A., Sibbert W.* Highly efficient and low threshold diode-pumped Kerr-lens mode-locked Yb:KYW laser // *Optics Express.* 2004. V. 12. P. 3928–3931.
15. *Яшин В.Е., Кулик А.В., Салль Е.Г., Чижов С.А., Kim G.H., Lee D.S., Kang U.* Фемтосекундный

генератор на Yb:KYW с прямой лазерной диодной накачкой // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 8. С. 11–16.

16. *Trebino R., Kane D.* Using phase retrieval to measure the intensity and phase of ultrashort pulses: frequency-resolved optical gating // JOSA. A. 1993. V. 10. P. 1101–1111.
  17. *Hönninger C., Paschotta R., Morier-Genoud F., Moser M., Keller U.* Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking // JOSA. B. 1999. V. 16. P. 46–56.
  18. *Siegman A.E.* Defining, measuring, and optimizing laser beam quality // Proc. SPIE. 1993. V. 1868. P. 2–10.
-