

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

© 2008 г. В. Е. Яшин*, доктор физ.-мат. наук; А. В. Кулик*; Е. Г. Салль*; С. А. Чижов*;
G. H. Kim**, PhD; D. S. Lee**, PhD; U. Kang**, PhD

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

E-mail: vyashin@yandex.ru

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

Описывается фемтосекундный лазер на Yb:KYW с прямой накачкой полупроводниковыми инжекционными лазерами. Лазерный кристалл Yb:KYW накачивался продольно излучением двух InGaAs полупроводниковых инжекционных лазеров, работающих на длине волны 981 нм. Пространственная структура излучения полупроводниковых лазеров переформировывалась оптической системой с целью максимальной концентрации их мощности в объеме лазерной среды. Генерация фемтосекундных импульсов производилась в режиме самосинхронизации продольных мод путем использования полупроводникового насыщающегося поглотителя. Средняя мощность генератора достигала 150 мВт на $\lambda \approx 1030$ нм при длительности импульсов около 200 фс. Производство длительности импульса на ширину спектра излучения всего лишь в 1,17 раза превышало теоретический предел для формы импульсов, описываемых функцией sech^2 . Разработанный задающий генератор может использоваться и как самостоятельный источник фемтосекундных световых импульсов, и в качестве затравочного источника для фемтосекундных лазерных усилительных систем.

Коды OCIS: 140.3480, 140.7090.

Поступила в редакцию 11.02.2008.

Введение

Исследование методов генерации ультракоротких лазерных импульсов (УКИ) является интенсивно разрабатываемым направлением лазерной физики и оптики на протяжении многих лет, что связано с такими замечательными их 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, подбывая энергию импульсов таким образом, чтобы по-

рог разрушения достигался только в максимумах распределения интенсивности [5].

За последние двадцать лет были получены хорошие результаты применения УКИ в лабораторных условиях. Однако перенос фемтосекундных лазерных технологий в промышленность сталкивается с рядом трудностей. В первую очередь это связано со сложностью самих фемтосекундных лазеров [6], большая часть из которых используют в качестве активной среды кристалл сапфира, активированный титаном ($\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$). Этот кристалл, обладая многими существенными достоинствами для генерации и усиления мощных фемтосекундных импульсов, имеет и существенный недостаток – для его накачки приходится применять достаточно мощное (более 3–5 Вт) непрерывное лазерное излучение в зеленой области спектра. В качестве таких источников используются сложные, громоздкие и дорогие газовые аргоновые лазеры либо вторая гармоника излучения также достаточно сложных и дорогих твердотельных лазеров.

Существует и другой подход к разработке фемтосекундных лазерных систем для промышленных применений. Он заключается в использовании лазерных сред, допускающих прямую накачку излучением полупроводниковых инжекционных лазе-

ров, которая более компактна, надежна и дешева по сравнению с накачкой твердотельными лазерами. В последнее время в области разработки и создания лазерных диодов с высокой яркостью излучения достигнут значительный прогресс, приведший к существенному уменьшению стоимости лазерных диодов и увеличению их мощности. Фемтосекундные лазерные системы на основе такого подхода могут быть сделаны весьма простыми и компактными, поскольку они используют компактные лазерные диодные источники накачки вместо крупногабаритных и сложных твердотельных или газовых лазеров. Стабильность фемтосекундных лазерных систем с прямой лазерной диодной накачкой можно также повысить, размещая лазерные диоды как можно ближе к лазерному кристаллу и накачивая усилители, часто входящие в состав лазерных 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 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 данной статье описывается фемтосекундный задающий генератор с прямой продольной накачкой кристалла Yb:KYW высокояркостными полупроводниковыми инжекционными InGaAs-лазерами. Путем выбора оптимальной схемы лазерного резонатора с компенсацией дисперсии парой призм и оптимизации параметров выходного зеркала и полупроводникового модулятора добротности была реализована стабильная на протяжении многих часов работа генератора в режиме синхронизации продольных мод.

Экспериментальная установка

Оптическая схема генератора показана на рис. 1. В качестве активной среды использовался кристалл Yb:KYW толщиной 3 мм. Кристалл содержал 5 ат.% ионов Yb^{3+} (примерно $7,6 \times 10^{20} \text{ Yb}^{3+} \text{ ат/см}^3$) и был вырезан таким образом, чтобы излучение накачки

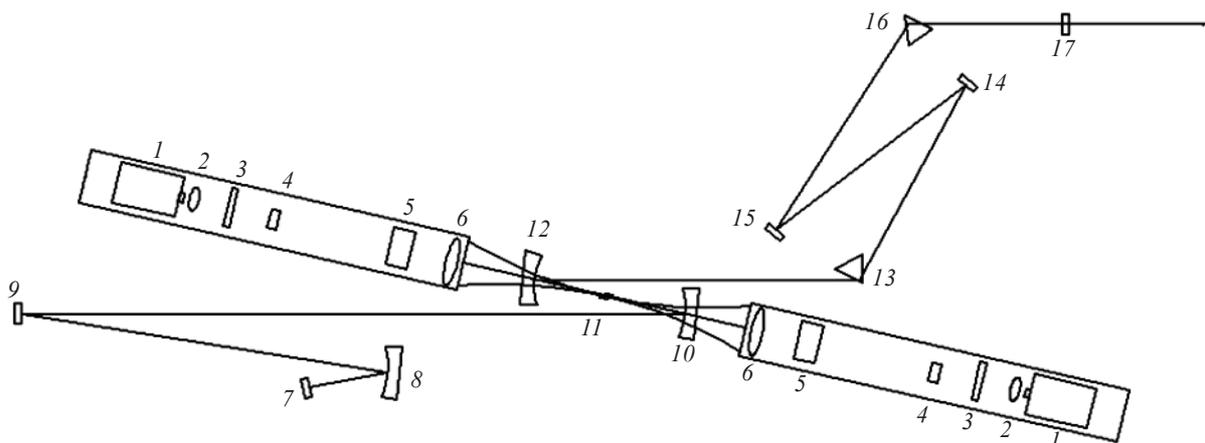


Рис. 1. Оптическая схема лазера с прямой накачкой излучением полупроводниковых инжекционных лазеров. 1 – лазерный диод, 2 – асферическая линза $f = 8 \text{ мм}$, 3 – полуволновая пластинка, 4, 5 – цилиндрический телескоп, 6 – ахроматический дублет $f = 75 \text{ мм}$, 7 – SAM, 8 – зеркало $R = 100 \text{ мм}$, 9, 14, 15 – плоские зеркала; 10, 12 – дихроичные зеркала $R = 100 \text{ мм}$; 11 – кристалл Yb:KYW, 13, 16 – дисперсионные призмы; 17 – выходное зеркало.

распространялось вдоль кристаллографической оси b . Вектор поляризации накачки был параллелен оси a , что обеспечивало максимальный коэффициент поглощения. Лазерный кристалл, расположенный под углом Брюстера по отношению как к излучению накачки, так и к генерируемому излучению, размещался в лазерном резонаторе. Для уменьшения размеров резонатора его схема была сложена с использованием плоских высокоотражающих диэлектрических зеркал. Кристалл был помещен между двумя вогнутыми дихроичными зеркалами с радиусами кривизны $R = 100$ мм.

Для накачки лазерного кристалла использовались два полупроводниковых инжекционных лазера компании “Эльфолум” или “JDS Uniphase” с размером излучающей площадки 1×100 мкм² и максимальной выходной мощностью 4 Вт. Пучки накачки имели линейную поляризацию, направленную вдоль большего размера излучающей зоны (так называемая медленная ось) и перпендикулярно излучению генерации лазера. Качество пучков накачки вдоль быстрой и медленной осей (вдоль короткой и длинной сторон излучающего прямоугольника) характеризовалось параметром $M^2 \approx 1 \times 8$. Заметим, что этот параметр качества является несимметричным и примерно показывает превышение угловой расходимости пучка полупроводниковых лазеров над дифракционным пределом. Длина волны излучения полупроводниковых лазеров была равна 981 нм при 25 °С и могла смещаться со скоростью 0,3 нм/°С путем изменения температуры термоэлектрических элементов (элемент Пелтье), на которых были смонтированы диоды. Такое изменение температуры использовалось нами для максимизации поглощения излучения накачки в активном элементе.

Для формирования оптимального пространственного профиля излучения накачки внутри лазерного кристалла, который должен наилучшим образом совпадать с пространственной структурой излучения генерации, мы использовали формирующую оптическую систему. Сначала излучение лазерных диодов коллимировалось коммерческой асферической линзой с фокусным расстоянием $f \approx 8$ мм, а затем размер пучка вдоль медленной оси увеличивался приблизительно в 8 раз цилиндрическим телескопом. Это делалось для того, чтобы примерно уравнивать угловые расходимости излучения вдоль обеих осей. После такого переформирования пучки накачки фокусировались в объем лазерного кристалла с помощью коммерческих ахроматических дублетов с фокусным расстоянием 65 мм. В результате в фокусе линзы были получены измеренные в воздухе с помощью ПЗС-камеры пучки накачки с размером сечения 100×70 мкм² по

$1/e^2$ -уровню интенсивности, что удовлетворительно согласуется с размером лазерной моды резонатора лазера. Для согласования поляризаций излучения накачки и генерации поляризация накачки поворачивалась на 90° с помощью фазовой $\lambda/2$ -пластинки. Поскольку длины волн генерации ($\lambda \approx 1030$ нм) и накачки (981 нм) расположены близко друг к другу, дихроичные зеркала должны по возможности иметь резкий край пропускания, расположенный вблизи длины волны накачки. Измерения показали, что лучшие многослойные диэлектрические дихроичные зеркала, изготовленные в ГОИ, пропускали до 80% мощности накачки при отражении более 99,5% излучения на $\lambda \approx 1030$ нм. Аналогичные зеркала производства компании “CVI” пропускали 90% мощности накачки при таком же отражении на длине волны генерации. Как показали измерения, лазерный кристалл Yb:KYW толщиной 3 мм поглощал 95% мощности падающего на него излучения накачки.

Как хорошо известно, 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 – призмные линии задержки и (или) chirпированные зеркала. Как первое, так и второе устройства имеют свои достоинства и недостатки. В описываемом лазере для компенсации дисперсии мы использовали пару призм из стекла ТФ-4 (аналог стекла SF10 компании “Schott”), расположенных в одном из плечей резонатора. Выходное зеркало с пропусканием 2 или 4% размещалось после второй призмы. Во втором плече резонатора излучение генерации фокусировалось вогнутым зеркалом с $R = 100$ 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 глубиной модуляции ΔR от 0,4 до 2,6% (начальное поглощение A_0 от 0,7% до 4%).

Для регистрации цуга сверхкоротких импульсов использовался быстрый фотодиод и широкополосный осциллограф LeCroy (ширина полосы пропускания 1 ГГц). Длительность импульсов измерялась с помощью автокоррелятора второго порядка PulseCheck и спектрального автокорреляционного устройства фирмы “Swamp Optics”, использующего методику FROG. Одновременно с помощью спектрометра фирмы “Ocean Optics” с компьютерным интерфейсом регистрировался также спектр

излучения. Средняя мощность излучения измерялась приемником компании “Ophir”.

Результаты и их обсуждение

В начале исследований нами была получена генерация в непрерывном режиме, когда зеркальный насыщающийся поглотитель был заменен обычным высокоотражающим зеркалом. В этом режиме была получена средняя мощность 600 мВт в многомодовом режиме генерации при полной мощности накачки 8 Вт (на кристалл падало примерно 4 Вт). Путем оптимизации геометрии резонатора была получена близкая к одномодовой генерация (TEM_{00} мода) с мощностью 490 мВт при той же мощности накачки. В обоих случаях использовалось выходное зеркало с пропусканием 4%. Относительно низкую (примерно 16% из света в свет) энергетическую эффективность лазера при работе в одномодовом режиме можно объяснить недостаточно хорошим согласованием моды резонатора и объемным распределением накачки внутри лазерного кристалла. Возможные способы повышения эффективности могут заключаться в улучшении согласования моды и накачки, а также в использовании более тонкого кристалла [12, 13]. В последнем случае необходимо увеличить концентрацию ионов иттербия до 10–15%, что вполне допустимо для данного типа лазерных кристаллов без потери их оптического качества и уменьшения времени жизни возбужденного состояния. Спектр непрерывной генерации шириной около 0,8 нм центрировался на длине волны 1035 нм.

Для перехода в режим генерации УКИ в качестве “глухого” зеркала использовались зеркала с нанесенным на них полупроводниковым насыщающимся поглотителем (SAM). Для компенсации дисперсии, как это указывалось ранее, использовалась пара призм из стекла ТФ-4. Для увеличения мощности излучения внутри резонатора, а значит, и на SAM-зеркале использовалось выходное зеркало с коэффициентом пропускания 2% вместо 4%. Изучалось влияние различных SAM-зеркал с глубиной модуляции $\Delta R = 0,4\text{--}2,6\%$ на стабильность режима самосинхронизации продольных мод. Как показали наблюдения за осциллограммами фемтосекундных импульсов, для $\Delta R = 0,4\%$ режим синхронизации мод был очень нестабильным. Для $\Delta R = 0,5\%$ наблюдался смешанный режим самосинхронизации мод и модуляции добротности [14], что проявлялось в периодическом изменении амплитуды фемтосекундных импульсов (рис. 2а). Наиболее стабильная работа лазера наблюдалась с модуляторами, имеющими $\Delta R = 1,6\text{--}2,6\%$. Однако при таких

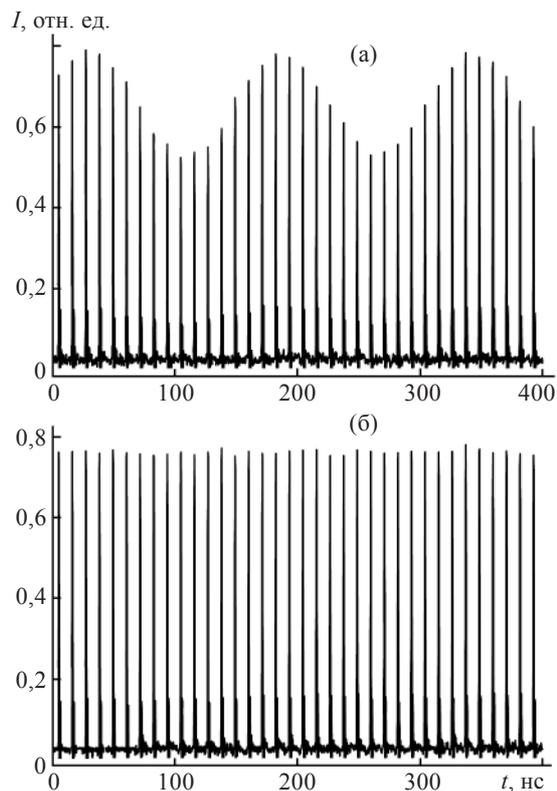


Рис. 2. Осциллограммы последовательности импульсов осциллятора (интенсивность I) при использовании SAM с глубиной модуляции $\Delta R = 0,5\%$ (а) и $1,2\%$ (б).

значениях глубины модуляции иногда происходил пробой SAM-зеркала, что связано с возросшей мощностью излучения внутри резонатора. Поэтому выбор оптимальной глубины модуляции $\Delta R = 1,2\text{--}2\%$ был обусловлен компромиссом между стабильностью работы лазера и отсутствием пробоя зеркала. Как это видно из осциллограммы на рис. 2б, уже для $\Delta R = 1,2\%$ реализуется стабильный режим работы. Средняя мощность излучения в этом режиме составляла около 100–150 мВт при частоте следования импульсов 90 МГц, что дает энергию одиночного фемтосекундного импульса 1,1 нДж.

На рис. 3 показаны временная форма импульса по данным FROG (а) и спектр 200 фс-лазерных импульсов (б). Как видно, генерация происходила на центральной длине волны $\lambda = 1030$ нм, ширина полосы была равна 6,5 нм. Произведение ширины спектра и длительности импульса $\Delta\omega_p \tau_p = 2,31$, что лишь в 1,17 раза превышает предел для импульсов с профилем интенсивности, описываемой sech^2 -функцией [1]. Эти данные, а также данные FROG показывают, что в генерируемых фемтосекундных импульсах практически отсутствует частотная модуляция (чирп).

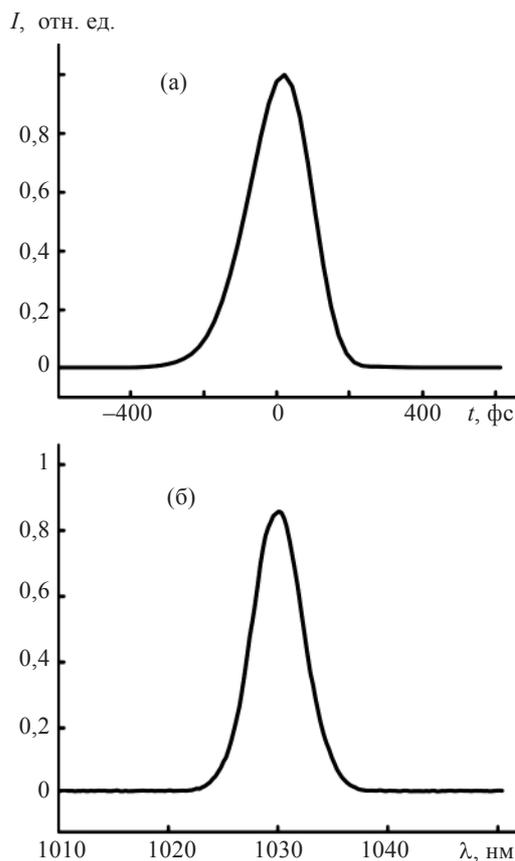


Рис. 3. а – временная форма импульса (интенсивность I) на выходе лазера по данным FROG, $\tau_{\text{FWHM}} = 200$ фс; б – спектр импульса на выходе лазера, $\lambda = 1030$ нм, $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 6,5$ нм.

Отметим, что получение стабильных одиночных на аксиальном периоде фемтосекундных импульсов требует тщательной юстировки оптической линии задержки, состоящей из пары призм. Это осуществлялось как тщательным выставлением расстояния между призмами (46 см), так и тонкой регулировкой дисперсии путем изменения длины пути света внутри призмы. При этом контроль за качеством фемтосекундных импульсов осуществлялся как по их спектру (отсутствие модуляции), так и по автокорреляционной функции.

Вид выходного пучка и соответствующий профиль интенсивности приведены на рис. 4. Было также измерено качество выходного пучка, характеризуемое параметром M^2 [15]. Этот параметр рассчитывался при измерении эволюции диаметра лазерного пучка при его распространении и для двух взаимно перпендикулярных направлений составил $M_x^2 = 1,04$ и $M_y^2 = 1,15$, что близко к $M^2 = 1$ для идеального гауссова пучка.

Мы также провели измерения стабильности выходной мощности лазера при его непрерывной ра-

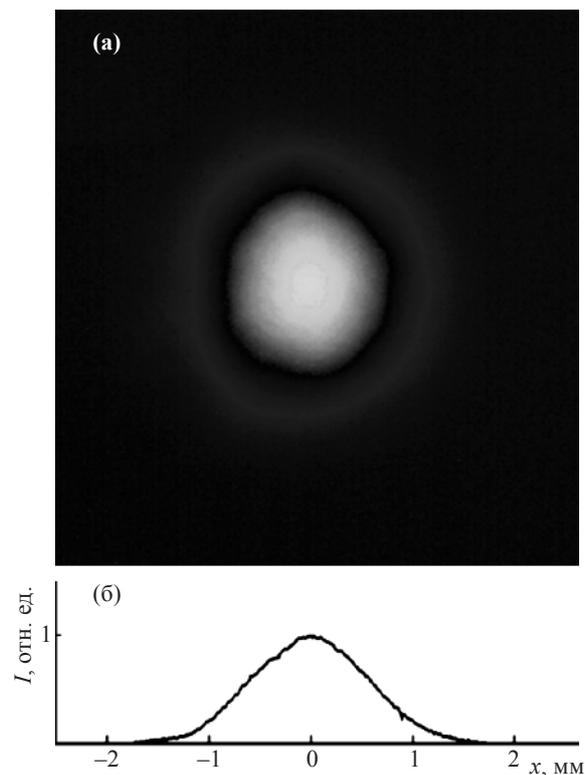


Рис. 4. Пространственная структура пучка на выходе лазера (а) и соответствующий профиль интенсивности I (б).

боте. Эти измерения показали, что мощность лазера была стабильна в пределах $\pm 1,3\%$ в течение 2 ч. Дальнейшее повышение стабильности до уровня флуктуаций менее 1% возможно при использовании систем обратной связи регулирования мощности накачки в зависимости от мощности генерации.

Заключение

Таким образом, нами был разработан фемтосекундный генератор на кристалле Yb:KYW с прямой накачкой излучением лазерных диодов. Он позволяет генерировать непрерывную последовательность оптических импульсов длительностью 200 фс на частоте 90 МГц со средней мощностью излучения около 150 мВт. Произведение длительности импульса и ширины спектра близко к теоретическому пределу, что указывает на отсутствие частотной модуляции. Полученные параметры генератора позволяют использовать его в качестве заправочного источника фемтосекундных импульсов для многопроходных или регенеративных усилителей с прямой диодной накачкой. Можно ожидать, что разработка таких компактных лазерных систем открывает возможности их широкого применения.

В заключение авторы выражают благодарность Корейскому фонду международного сотрудничества в области науки и технологий (KICOS), управляемого Министерством науки и технологий (MOST) республики Корея, за поддержку данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Diels J.-C., Rudolph W.* Ultrashort laser pulse phenomena: fundamentals, techniques, and applications on femto-second 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 Y b-dope d $KY(WO_4)_2$ and $KGd(WO_4)_2$ // 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.
11. *Trebino R., Kane D.* Using phase retrieval to measure the intensity and phase of ultrashort pulses: frequency-resolved optical gating // JOSA. 1993. V. 10. P. 1101–1111.
12. *Paunescu G., Hein J., Sauerbrey R.* 100 fs diode-pumped Yb:KGW mode-locked laser // Appl. Phys. B. 2004. V. 79. P. 555–558.
13. *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.
14. *Honinger 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.
15. *Siegman A.E.* Defining, measuring, and optimizing laser beam quality // Proc. SPIE. 1993. V. 1868. P. 2.