

Фемтосекундная лазерная система на основе тонких стержневых активных элементов из Yb:YAG с выходной мощностью 110 Вт

Ч.Янг, Б.Ли, Ч.В.Ким, Б.Джонг, Е.Г.Салль, С.А.Чижов, Д.Хо, В.Е.Яшин, Г.Х.Ким

Разработана и создана трехкаскадная лазерная усилительная система на основе тонких стержней из Yb:YAG с лазерной диодной накачкой. Средняя мощность непрерывной последовательности фемтосекундных импульсов задающего генератора на Yb:KGW с частотой следования импульсов 80 МГц и первоначальной длительностью 128 фс увеличилась в данной системе более чем в 100 раз и превысила 100 Вт. Введение предварительного chirпирования лазерных импульсов позволило скомпенсировать дисперсию в оптических элементах системы и получить на выходе импульсы длительностью 580 фс. Удлинение первоначального импульса связано с обужением спектра в усилителях.

Ключевые слова: лазерные усилители на Yb:YAG с диодной накачкой, высокая средняя мощность излучения, фемтосекундные импульсы.

1. Введение

Использование тонких стержней диаметром около 1 мм в качестве активных лазерных элементов позволяет существенно подавить паразитные термофизические процессы и увеличить тем самым среднюю мощность и яркость генерируемого или усиливаемого излучения по сравнению с использованием активных элементов большего размера. В результате средняя мощность лазеров на тонких стержнях из Yb:YAG достигает уже сотен ватт при хорошем качестве пучка [1]. Большее усиление в таких элементах вследствие большей концентрации мощности накачки дает возможность уменьшить длину усилительной среды и, как следствие, частично подавить воздействие излучения, ограничивающее пиковую мощность при усилении сверхкоротких импульсов. Это, в свою очередь, позволяет прямо усиливать фемтосекундные лазерные импульсы без применения техники усиления chirпированных импульсов [1, 2]. Однако следует отметить, что усиление в такой обычно используемой среде, как Yb:YAG с достаточно узкой полосой усиления, приводит к значительному обужению спектра при усилении лазерных импульсов длительностью 100 фс и к их существенному (до 1000 фс) удлинению [1–4].

В настоящей работе подробно исследовано прямое усиление в трехкаскадном усилителе на тонких стержнях из Yb:YAG до средней мощности более 100 Вт непрерывной последовательности лазерных импульсов длительностью 120 фс от задающего генератора на кристалле Yb:KGW, следующих с частотой 80 МГц. Введение пред-

варительного chirпа, компенсирующего дисперсию в элементах усилительной системы, позволило получить на выходе импульсы длительностью менее 600 фс. Некоторые характеристики отдельных усилителей на тонких стержнях и результаты численного моделирования их параметров описаны в работе [5]. В более ранней нашей работе [4] кратко сообщалось о получении средней мощности 100 Вт.

2. Экспериментальная установка

Оптическая схема лазерной системы показана на рис.1. Система состоит из фемтосекундного задающего генератора (ЗГ) на основе кристалла Yb:KGW и трех усилительных модулей на тонких стержнях из кристалла Yb:YAG. Задающий генератор ранее использовался нами в усилительной системе на Yb:KGW [6] и генерировал непрерывную последовательность лазерных импульсов длительностью 120 фс с частотой следования 80 МГц. Хотя центральная длина волны излучения ЗГ на Yb:KGW $\lambda = 1035$ нм отличается от длины волны $\lambda = 1030$ нм, соответствующей максимуму усиления для среды Yb:YAG, спектральные контуры усиления этих двух сред в значительной степени перекрываются, что обеспечивает эффективное усиление.

Два первых усилительных каскада работали по двухпроходной схеме с четвертьволновой развязкой. В первом каскаде использовался усилительный модуль с конусным активным элементом длиной 40 мм с изменяющимся от 0.8 до 0.3 мм диаметром, разработанный в Институте прикладной физики (ИПФ) РАН [3]. Концентрация иттербия составляла 1 ат.%. Усилитель накачивался лазерной диодной линейкой с волоконным выходом диаметром 105 мкм (компания JDSU) и с максимальной мощностью излучения 150 Вт на длине волны 940 нм. Излучение линейки фокусировалось в объем активного элемента дублетом линз в пятно диаметром ~ 300 мкм. Лазерный пучок ЗГ также фокусировался в активный элемент таким образом, чтобы обеспечить оптимальное перекрытие его с пучком накачки. Усиленное лазерное из-

J.Yang, B.Lee, J.W.Kim, B.Jeong, E.G.Sall, S.A.Chizhov, D.Heo, G.H.Kim. Electro-Medical Device Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute, 111 Hangeaui-ro Sangnok-gu Ansan-si, Gyeonggi-do, 15588, Republic of Korea; e-mail: ghkim@keri.re.kr
В.Е.Яшин. АО «Государственный оптический институт им. С.И.Вавилова», Россия, 199053 С.-Петербург, Кадетская л., 5, корп.2; e-mail: vyashin@yandex.ru

Поступила в редакцию 15 августа 2019 г., после доработки – 30 сентября 2019 г.

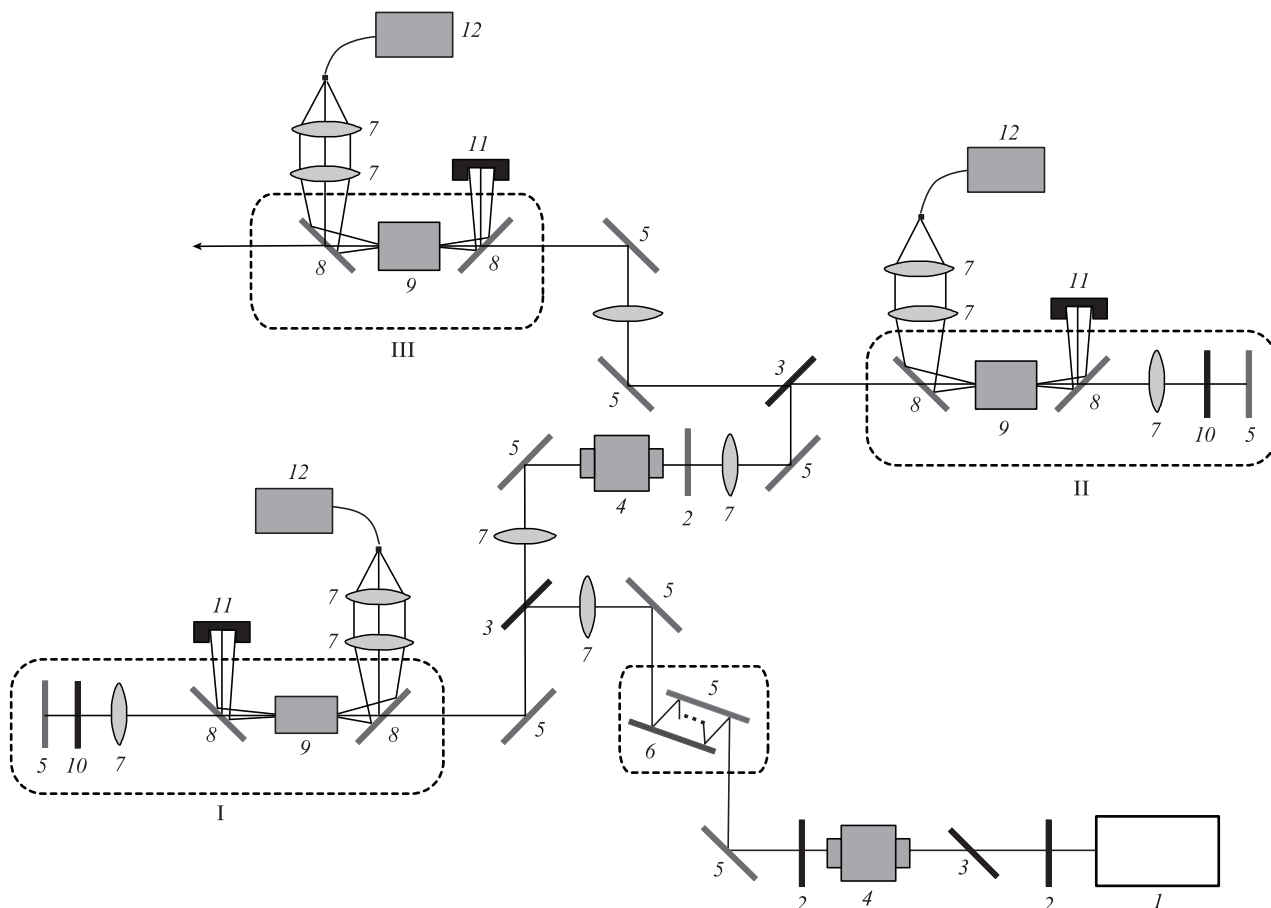


Рис.1. Схема фемтосекундной лазерной системы с усилителями на тонких стержнях:

I и II – первый и второй двухпроходные каскады усиления, III – третий однопроходный каскад усиления; 1 – ЗГ на кристалле Yb:KGW; 2 – полуволновые пластинки; 3 – тонкопленочные поляризаторы; 4 – изолятор Фарадея; 5 – высокоотражающие зеркала; 6 – чирпированное зеркало; 7 – линзы; 8 – дихроичное зеркало; 9 – тонкие стержневые активные элементы; 10 – четвертьволновые фазовые пластинки; 11 – поглотители; 12 – лазерные диодные линейки накачки.

лучение коллимировалось сферической линзой после прохождения через тонкопленочный поляризатор.

Во втором каскаде, также разработанном в ИПФ РАН, использовался активный элемент (компания Shasta) диаметром 1 мм и длиной 30 мм с содержанием иттербия 2 ат.%. Накачка усилителя осуществлялась таким же полупроводниковым лазерным модулем, как и накачка первого усилителя в аналогичной оптической схеме.

Третий усилительный каскад на основе модуля Taranis [7] с активным элементом диаметром 1 мм и длиной 40 мм накачивался полупроводниковым лазерным модулем (компания nLight) с максимальной мощностью излучения 200 Вт на выходе волокна диаметром 200 мкм. На входе в усилитель мощность излучения была уже достаточно большой, поэтому усилитель работал в однопроходном режиме.

Поскольку лазерная система обладала значительным усилением (более чем в 100 раз), в ней для предотвращения самовозбуждения схемы использовался изолятор Фарадея, установленный между первым и вторым усилителями.

Для компенсации дисперсионного расплывания импульсов в элементах усилительной системы применялось чирпированное зеркало, вносящее отрицательную дисперсию $GDD \approx -10000 \text{ фс}^2$ при одном отражении от зеркала. Общая величина дисперсии подбиралась экспериментально путем изменения числа отражений от чирпиро-

ванного зеркала, которое использовалось вместе с обычным высокоотражающим зеркалом.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис.2 показана зависимость выходной мощности первого усилителя от мощности излучения накачки как в однопроходном, так и в двухпроходном режиме усиления. Видно, что в двухпроходном режиме выходная мощность достигает 14 Вт, а общее усиление равно 14. Центральная длина волны усиленного излучения составила 1030.4 нм, а ширина спектра по полувысоте – 3.1 нм. Несмотря на существенное подавление термооптических эффектов в тонких активных элементах, наблюдалась небольшая деполяризация излучения, равная 7.8% за два прохода. Из-за небольшой мощности входного сигнала оптическая эффективность была относительно невелика (~10%).

Результаты измерений мощности излучения на выходе второго усилителя в зависимости от мощности накачки представлены на рис.3. Выходная мощность при двухпроходном усилении превышала 60 Вт, оптическая эффективность съема мощности по отношению к поглощенной мощности достигала 31%. При этом спектр сужался до 2.5 нм, а длительность сжатого импульса составляла

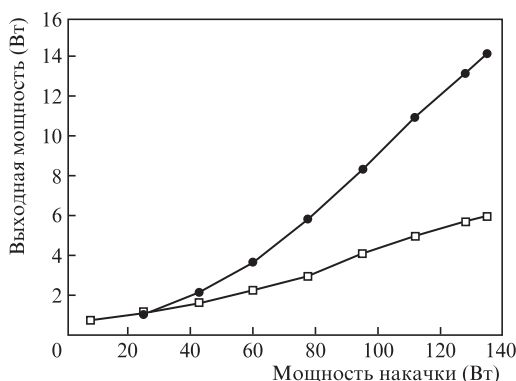


Рис.2. Выходная мощность первого усилителя в зависимости от мощности накачки для одного (□) и двух (●) проходов.

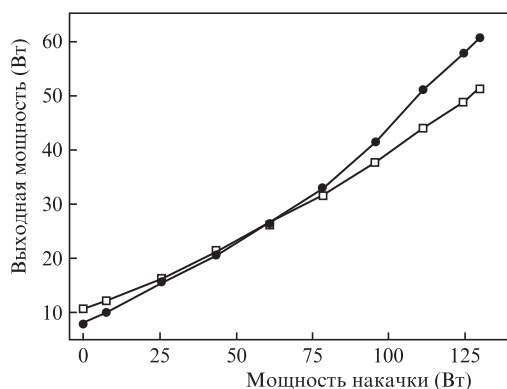


Рис.3. Выходная мощность второго усилителя в зависимости от мощности накачки для одного (□) и двух (●) проходов.

499 фс. Измерения показали, что пучок сохранял достаточно высокое качество ($M_x^2 = 1.21$, $M_y^2 = 1.25$), что свидетельствует об отсутствии серьезных термооптических aberrаций.

Данные для третьего каскада усиления, работающего в однопроходном режиме, приведены на рис.4. Выходная мощность превышала 110 Вт при мощности накачки 180 Вт. Соответственно эффективность преобразования составляла 28% (31% по отношению к поглощенной мощности).

На рис.5 приведены спектр и автокорреляционная функция фемтосекундных лазерных импульсов на выходе системы. Видно, что центральная длина волны спектра совпадает с центральной длиной волны люминесценции кристалла Yb:YAG, исходный спектр сужается до 2.4 нм, а

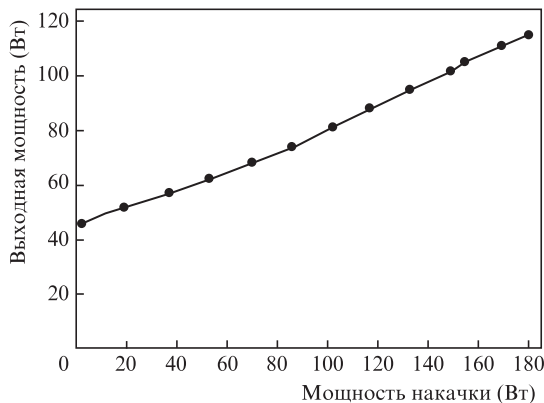


Рис.4. Выходная мощность третьего усилителя в зависимости от мощности накачки.

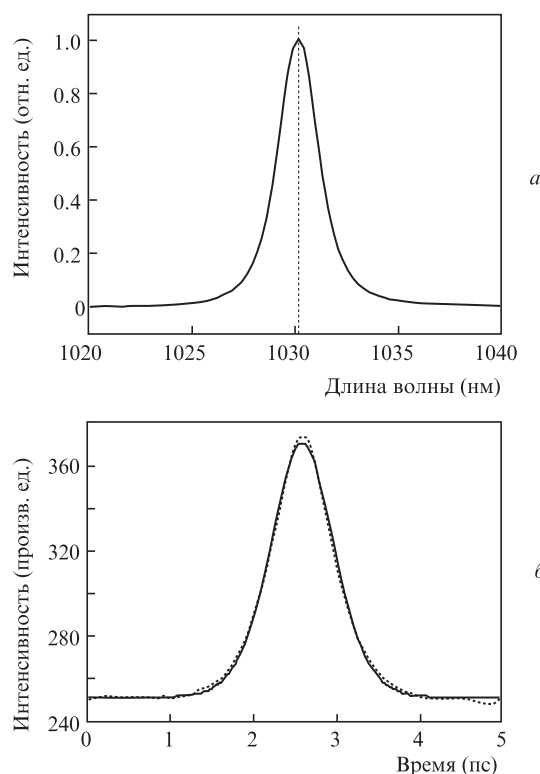


Рис.5. Спектр (а) и автокорреляционная функция (б) фемтосекундных лазерных импульсов на выходе лазерной системы. Пунктирная кривая соответствует автокорреляционной функции sech^2 -импульса.

длительность импульса составляет 580 фс при использовании chirпированного зеркала. Произведение длительности импульса на ширину спектра дает значение 0.39, немного отличающееся от предельного значения 0.315 для идеального sech^2 -импульса. Без предварительной фазовой модуляции излучения длительность фемтосекундных импульсов на выходе была примерно в 1.25 раза больше, что совпадает с результатами измерений, приведенными в работе [1].

Величина фазовой модуляции (отрицательного chirпа) на входе в систему могла меняться путем изменения числа отражений от chirпированного зеркала. Измерения длительности импульса после второго усилителя показали, что минимальная длительность (500 фс) реализуется после четырех отражений от chirпированного зеркала. Это число отражений использовалось в дальнейшем для всей усилительной системы.

Более высокая мощность накачки обуславливала возникновение более сильной термооптической линзы с aberrациями, что сказывалось на качестве пучка. Измерения стандартного параметра качества излучения M^2 на выходе системы дали значения $M_x^2 \times M_y^2 = 1.9 \times 1.8$ при выходной мощности 100 Вт. Качество пучка может быть улучшено при втором проходе через усилитель, однако он не использовался из-за самовозбуждения усилительной системы в целом. Это можно сделать в дальнейшем при подавлении самовозбуждения путем применения дополнительных оптических развязок.

Проверялась также возможность возникновения и развития самофокусировки излучения, являющейся одним из главных ограничителей пиковой мощности в твердотельных лазерных системах [8]. Для развития крупномасштабной самофокусировки, как это хорошо известно, необходимо превышение пиковой мощностью импульса крити-

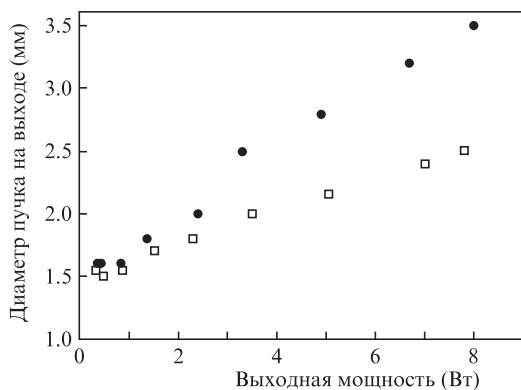


Рис. 6. Диаметр лазерного пучка на выходе системы в зависимости от выходной мощности при частоте следования импульсов 80 МГц (□) и 1 МГц (●).

ческой мощности P_{cr} , а для развития мелкомасштабной самофокусировки требуются значения B -интеграла, большие единицы [8]. При величине нелинейного показателя преломления $n_2 = 6.9 \times 10^{-20} \text{ м}^2/\text{Вт}$ для кристалла YAG [9, 10] получим $P_{cr} = 3.77\lambda^2 / (8\pi n^2 n_0) \approx 1.9 \text{ МВт}$, что сопоставимо с пиковой мощностью сверхкоротких импульсов $P \approx 2.5 \text{ МВт}$ на выходе усилительной системы. Такой мощности, очевидно, уже может быть достаточно для развития самофокусировки. Более сильное влияние самофокусировки определенно становится возможным при переходе к киловаттным мощностям или при уменьшении частоты следования импульсов при условии сохранения средней мощности.

Для определения пороговых значений энергии, при которых начинает проявляться самофокусировка в усилителях, были проведены измерения зависимости размера пятна светового пучка от энергии импульсов на расстоянии $\sim 1 \text{ м}$ от второго усилителя. При этом для увеличения энергии импульсов их частота следования была уменьшена до 1 МГц с помощью дополнительной ячейки Поккельса. Выходная мощность излучения изменялась фильтром на основе поляризаторов и полуволновой фазовой пластинки на входе в систему. Из рис. 6, где приведены зависимости диаметра пучка от выходной мощности, видно, что диаметр пучка заметно увеличивается, начиная с мощности $\sim 3.5 \text{ Вт}$, соответствующей энергии 3.5 мкДж, которую условно можно принять за порог самофокусировки. Такая энергия отвечает пиковой мощности $P \approx 6 \text{ МВт}$. При этом, как показали результаты измерений с помощью ПЗС-камеры, пучок сохранял свою форму и при дальнейшем увеличении мощности вплоть до 8.5 Вт. Внутри активного элемента не наблюдались какие-либо треки разрушений, которые могли бы быть связаны с филаментацией пучка. Также не наблюдалось и уширения спектра, которое могло бы свидетельствовать о фазовой самомодуляции.

Отметим, что керровская нелинейность, вследствие которой происходит самофокусировка, может играть и положительную роль в фемтосекундных лазерных системах, приводя к фазовой самомодуляции с дальнейшим сжатием импульса чирпированными зеркалами [11, 12]. Однако возможность использования этого эффекта в усилительной системе на основе тонких стержней с фокусировкой лазерных пучков в объем активной среды требует дальнейшего исследования, поскольку в этом случае возможна филаментация излучения [13] и связанная с ней модификация материала.

4. Заключение

Представлены результаты разработки фемтосекундной лазерной системы со 100-ваттной мощностью на основе трех тонкостержневых усилителей. Общее усиление системы в режиме насыщения составило более 100, что сравнимо с усилением в регенеративном усилителе. Выходная мощность превысила 110 Вт при оптической эффективности системы 26%, что дает энергию импульсов 1.38 мкДж при частоте их следования 80 МГц. Из-за ограниченности частотной полосы усиления кристалла Yb:YAG происходило сужение спектра до 2.4 нм, что приводило к удлинению импульса до 580 фс, существенно меньшему, однако, чем в отсутствие коррекции дисперсионного расщепления (800 фс) [1]. Об эффективности коррекции свидетельствует также тот факт, что произведение ширины спектра $\Delta\omega$ на длительность импульса τ ($\Delta\omega\tau = 0.39$ в предположении sech^2 -формы импульса) характерно для импульса, близкого к спектрально ограниченному.

Основным недостатком разработанной усилительной системы является необходимость использования большого числа развязок для предотвращения ее самовозбуждения. Функцию таких развязок в нашей системе выполняли изоляторы Фарадея.

В дальнейшем частота следования импульсов усилительной системы будет снижена до 1 МГц, что при сохранении средней мощности приведет к увеличению энергии до 100 мкДж. Это, в свою очередь, потребует использования метода усиления чирпированных импульсов [14] для подавления самофокусировки в тонких стержнях.

Авторы выражают благодарность О.В.Палашову, И.Б.Мухину и И.И.Кузнецову из Института прикладной физики РАН за предоставление усилительных модулей.

Работа была поддержана программой первичных исследований Корейского научно-исследовательского электротехнологического института через Национальный научно-исследовательский Совет науки и технологии, финансируемой Министерством науки и будущего планирования (№ 19-12-N0101-64).

1. Markovic V., Rohrbacher A., Hofmann P., Pallmann W., Pierrot S., Resan B. *Opt. Express*, **23**, 25883 (2015).
2. D len X., Zaouter Y., Martial I., Aubry N., Didierjean J., H nninger C., Mottay E., Balembois F., Georges P. *Opt. Lett.*, **38**, 109 (2013).
3. Kuznetsov I., Mukhin I., Palashov O., Ueda Ken-Ichi. *Opt. Lett.*, **43**, 3941 (2018).
4. Kim G.H., Yang J., Lee B., Kim J.W., Neo D.C., Чижов С.А., Салль Е.Г., Яшин В.Е. *Оптический журнал*, **85** (11), 29 (2018).
5. Lee B., Chizhov S.A., Sall E.G., Kim J.W., Kuznetsov I.I., Mukhin I.B., Palashov O.V., Kim G.H., Yashin V.E., Vadimova O.L. *J. Opt. Soc. Am. B*, **35**, 2594 (2018).
6. Ким Г.Х., Янг Ч., Ли Д.С., Кулик А.В., Салль Е.Г., Чижов С.А., Яшин В.Е., Канг У. *Квантовая электроника*, **42**, 292 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 292 (2012)].
7. www.fiberocryst.com.
8. Мак А.А., Сомс Л.Н., Фромзель В.А., Яшин В.Е. *Лазеры на неодимовом стекле* (М.: Наука, 1991).
9. Zelmon D.E., Small D.L., Page R. *Appl. Opt.*, **37**, 4933 (1998).
10. Major A., Aitchison J., Smith P.W.E., Druon F., Georges P., Viana B., Aka G.P. *Appl. Phys. B*, **80**, 199 (2005).
11. Pouysegur J., Delaigue M., Honninger C., Zaouter Y., Georges P., Druon F., Mottay E. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **21**, 212 (2015).
12. Dannecker B., Negel J.-P., Loescher A., Oldorf P., Reichel S., Peters R., Graf T., Ahmed M.A. *Opt. Commun.*, **429**, 180 (2018).
13. Кандидов В.П., Шленов С.А., Косарева О.Г. *Квантовая электроника*, **39**, 205 (2009) [*Quantum Electron.*, **39**, 205 (2009)].
14. Maine P., Strickland D., Bado P., Pessot M., Mourou G. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 398 (1988).