

Задающая система криогенного дискового Yb:YAG-лазера

Е.А.Перевезенцев, И.Б.Мухин, И.И.Кузнецов, О.Л.Вадимова, О.В.Палашов

Создана новая задающая система криогенного дискового Yb:YAG-лазера, состоящая из фемтосекундного источника, стретчера и регенеративного усилителя с выходной энергией 25 мкДж при частоте следования импульсов излучения 49 кГц с длительностью ~ 2 нс и шириной спектра ~ 1.5 нм. После увеличения мощности накачки регенеративного усилителя планируется достичь на входе криогенных каскадов усиления энергию импульсов ~ 1 мДж, что позволит получить на выходе криогенного лазера после компрессии импульсы длительностью несколько пикосекунд.

Ключевые слова: импульсный лазер, дисковый лазер, Yb:YAG, регенеративный усилитель, брэгговские решетки, дифракционные решетки.

1. Введение

В Институте прикладной физики РАН ведутся работы по созданию импульсно-периодического лазера с большой энергией в импульсе (~ 1 Дж) при высокой частоте следования импульсов (~ 1 кГц) [1]. В силовых усилительных каскадах используются активные элементы (АЭ) из Yb:YAG в форме тонкого диска, охлаждаемого до температуры жидкого азота. Использование данных технологий позволяет улучшить теплоотвод от АЭ, уменьшить термонаведенные искажения и повысить эффективность усиления. Задающей системой (ЗС) для таких криогенных усилителей является созданный нами генератор на базе диска из Yb:YAG с водяным охлаждением и следующими выходными параметрами: частота следования импульсов 1–2 кГц, энергия импульса ~ 1 мДж, длительность импульса, полученная при помощи модуляции добротности ячейкой Поккельса, 3–7 нс [1]. Одним из основных применений систем с большими энергией и частотой следования импульсов является накачка параметрических усилителей широкополосных фемтосекундных лазерных источников [2, 3]. Для этого требуется уменьшение длительности импульсов накачки до единиц пикосекунд и высокоточная синхронизация импульсов усиливаемого сигнала и накачки. Наиболее высокую степень синхронизации обеспечивает схема, в которой задающим источником излучения как для фемтосекундного канала, так и для канала накачки является широкополосный фемтосекундный лазер. Кроме того, данный источник позволяет получить накачку заданной длительности. Для реализации вышеуказанной концепции нами была приобретена коммерческая лазерная система «Antaus» фирмы

«Авеста», состоящая из волоконного фемтосекундного генератора с усилителем со следующими выходными параметрами: энергия 1 мкДж в импульсах длительностью 300 фс при ширине спектра 8 нм и частоте следования импульсов 3 МГц. Излучение данного источника делится на два канала: сигнальный и накачки. В дальнейшем сигнальный импульс планируется скомпрессировать в коммерческом газовом компрессоре до длительности ~ 20 фс и стретчировать чирпирующими зеркалами до длительности ~ 10 пс. В настоящей работе речь пойдет об излучении канала накачки, на базе которого создана новая лазерная ЗС для криогенного дискового усилителя.

2. Стретчер задающей системы

Согласно результатам экспериментов в криогенных каскадах без искажений усиливаются импульсы с шириной спектра ~ 0.7 нм по полувысоте, что соответствует спектрально ограниченному импульсу длительностью ~ 2 пс [1]. Для расчета параметров стретчера полная ширина спектра излучения $\Delta\lambda$ определялась по уровню 0.03 и равнялась 1.5 нм. Для того чтобы импульс с таким узким спектром растянуть во времени до 1 нс, необходима большая дисперсия групповой скорости материала стретчера, что сильно сужает набор подходящих оптических элементов.

2.1. Стретчер на базе голографических дифракционных решеток

В первых экспериментах была использована имеющаяся в наличии голографическая дифракционная решетка (ДР) размером 32×24 см с периодом 1200 штр./мм. Обычно стретчер состоит из пары ДР, разделенных оптической системой с увеличением -1 [4]. Такая оптическая система формирует в пространстве изображений «виртуальный компрессор», состоящий из пары параллельных ДР – второй решетки стретчера и изображения первой решетки [5–7]. При этом абсолютные значения дисперсии всех порядков точно согласованы (равны по абсолютной величине, но имеют противоположный знак) с дисперси-

Е.А.Перевезенцев, И.Б.Мухин, И.И.Кузнецов, О.Л.Вадимова, О.В.Палашов. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: palashov@appl.sci-nnov.ru, mib_1982@mail.ru, epervezentsev@gmail.com, ivanushka911@yandex.ru, musfex@mail.ru

Поступила в редакцию 29 января 2015 г., после доработки – 10 февраля 2015 г.

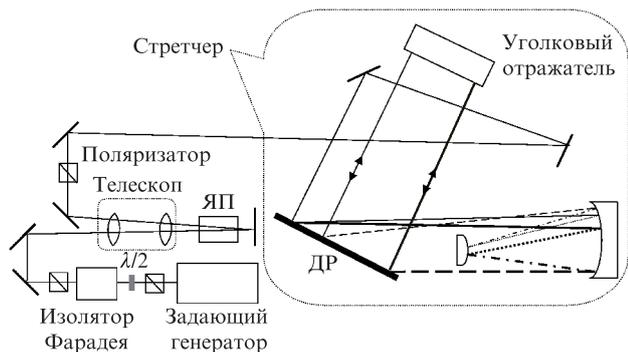


Рис.1. Схема стретчера на базе голографической ДР; тонкие линии соответствуют длинноволновому краю спектра, жирные – коротковолновому.

ями компрессора Трейси [4] при условии совпадения плотностей штрихов ДР и углов падения пучка на решетку. Таким образом, для создания стретчера сначала были рассчитаны параметры будущего компрессора [8–10]. При этом мы убедились, что размеров имеющейся ДР достаточно. В качестве оптической системы с увеличением -1 была выбрана $2Nf$ -оптическая система [11, 12] (или эквивалентные). Она состоит из двух конфокально расположенных положительных линз с одинаковыми фокусными расстояниями f и расположенной в их общем фокусе коллективной линзой. Фокусное расстояние отрицательной коллективной линзы определяется как $f_{col} = f/[2(N - 2)]$. Чаще всего на практике используется зеркальная оптическая система Мартинца с плоским коллективным зеркалом, $N = 2$ [7, 4], либо $6f$ -оптическая зеркальная система Оффнера с выпуклым коллективным зеркалом, $N = 3$ [13–19]. Для нас параметр N был свободным, давшем возможность рассчитать и собрать стретчер с необходимой дисперсией достаточно небольших размеров (120×100 см); в нашей схеме $N = 7$.

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Излучение задающего фемтосекундного источника проходит через изолятор Фарадея, затем с помощью ячейки Погкельса (ЯП) на кристалле ВВО (ЕКSМА, Литва) уменьшается частота следования импульсов, и излучение попадает в стретчер. Спектр и временной профиль выходного излучения приведены на рис.2. Видно, что полученные характеристики удовлетворяют нашим требованиям. Основным недостатком стретчера являлось то, что угол падения излучения на ДР ($\alpha = 15^\circ$) сильно отличался от угла Литтроу ($\theta_L = 38^\circ$), что приводило к большим потерям (из стретчера выходило всего 10% энергии). Проведенный далее оптимизационный расчет показал, что, используя стандартную ДР с периодом 1740 штр./мм, можно уменьшить ее ширину с 32 до 24 см и работать при угле падения, близком к углу Литтроу, так что потери будут минимальными. К тому же, чем ближе к трем параметр N , тем меньше aberrации. В оптимальной схеме $N = 4$.

2.2. Стретчер на базе объемных чирпирующих брэгговских решеток

В последние годы активно развиваются и совершенствуются технологии производства еще одного типа диспергирующих элементов – объемной чирпирующей брэгговской решетки (ОЧБР). Принцип действия ОЧБР похож на принцип действия чирпирующих зеркал, но при этом набегающая разность фаз между излучениями ко-

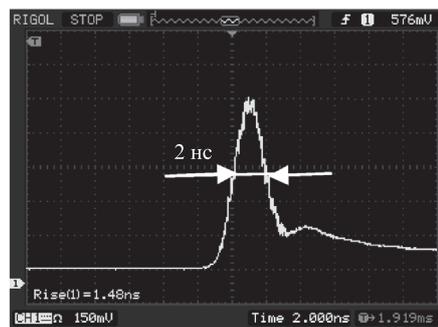
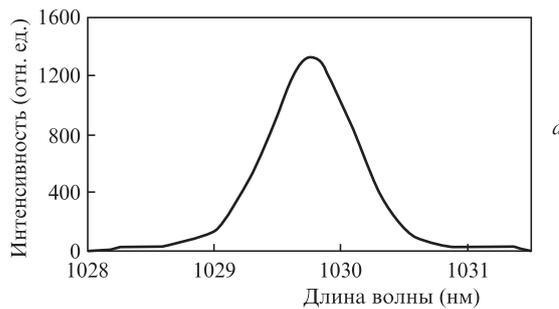


Рис.2. Спектр (а) и временной профиль (б) импульсов излучения на выходе стретчера на базе голографической ДР.

ротких и длинных волн на несколько порядков больше. ОЧБР не так универсальны, как голографические ДР, но при этом имеют преимущества: их легко настраивать, они компактны, могут давать как положительную, так и отрицательную дисперсию групповой скорости и т.д. До недавнего времени были коммерчески доступны ОЧБР с максимальным коэффициентом растяжения во времени 100 пс/нм за одно отражение, т.е. при ширине спектра импульса 0.7 нм необходимо было бы использовать более 15 отражений. Учитывая тот факт, что угол падения на ОЧБР задан, а каждая решетка стоит достаточно дорого, реализовать схему стретчера на данных решетках было проблематичным. Однако недавно появилась информация о коммерчески доступных ОЧБР компании OptiGrate с большим коэффициентом растяжения во времени за одно отражение [20]. Нами приобретены две решетки с коэффициентом растяжения во времени за одно отражение 220 пс/нм при ширине спектра 2.2 нм. Максимум отражения был на необходимой нам длине волны 1029.7 нм при угле падения на решетку 5° . Используя поляризационные методы развязки, мы собрали компактный стретчер с четырьмя отражениями от каждой решетки (рис.3). На выходе получились импульсы длительностью ~ 2 нс с шириной спектра ~ 1.5 нм, что соответствует необходимым нам значениям параметров (рис.4). Потери в нужном диапазоне спектра составили $\sim 50\%$.

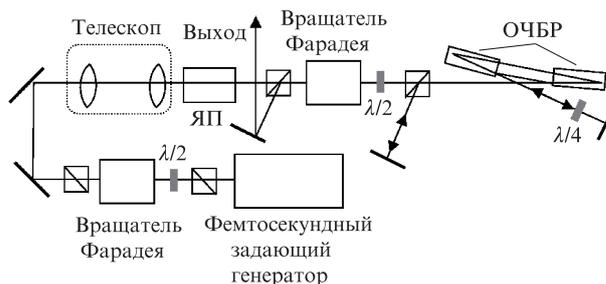


Рис.3. Схема стретчера на базе ОЧБР.

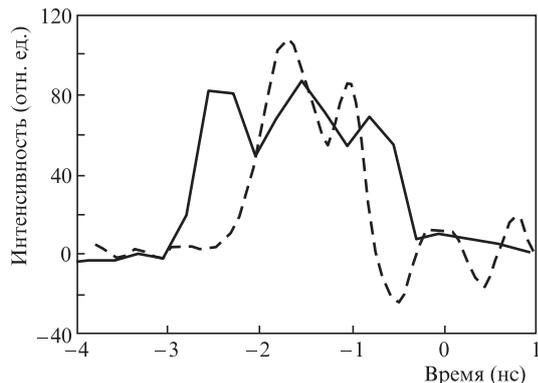


Рис.4. Временной профиль импульсов на выходе стретчера на базе ОЧБР (сплошная кривая) и на выходе регенеративного усилителя (штриховая кривая).

3. Регенеративный усилитель

Одной из проблем при использовании оптической синхронизации является необходимость усиления энергии сигнала накачки с субмикроджоульного уровня до нескольких джоулей. Для усиления на несколько порядков сигнала после стретчера предложено использовать усилитель на тонком стержне [21]. Такой тип АЭ может давать усиление за один проход 10–30 раз и позволяет обеспечить энергию импульса на выходе, превышающую 1 мДж, что более чем достаточно для входного сигнала криогенного дискового лазера.

Тонкий стержень из Yb:YAG (легирование 1%) диаметром 1.2 мм и длиной 30 мм используется в геометрии монокристаллического волокна (рис.5). Для этого излучение накачки заводится с двух торцов и проходит через кристалл, многократно отражаясь от его боковой грани в результате полного внутреннего отражения. Сигнальное излучение заводится через дихроичные зеркала и проходит через АЭ свободно, не касаясь его боковых граней. Стержень охлаждается с боковой стороны, для этого он монтируется внутри медного радиатора с использованием индиевого припоя в качестве промежуточного материала. Радиатор охлаждается проточной водой, протекающей по его внутренним каналам.

В разработанном квантроне на основе тонкого стержня измерено усиление слабого сигнала (рис.6) в зависимости

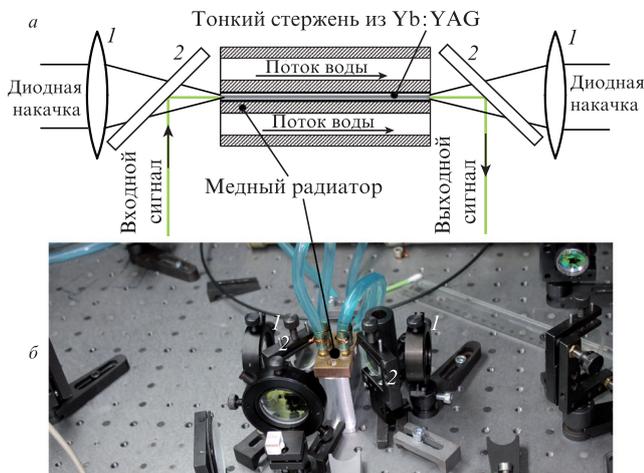


Рис.5. Схема охлаждения и накачки тонкого стержня из Yb:YAG (а) и внешний вид квантрона на тонком стержне (б).

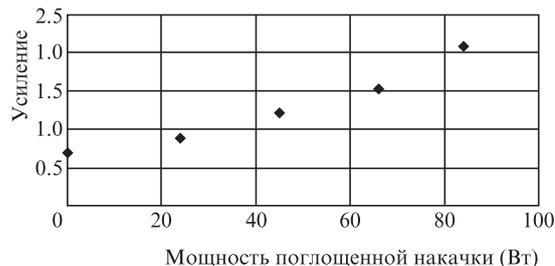


Рис.6. Усиление слабого сигнала в тонком стержне при непрерывной накачке.

сти от мощности накачки. Максимальное усиление за один проход составило только два раза, что связано с небольшой плотностью мощности накачки. Действительно, усиление в АЭ становится больше единицы при поглощенной мощности накачки 30 Вт, что полностью соответствует как расчетам, так и результатам работ [21, 22]. Отметим, что при импульсной и непрерывной накачках усиление практически одинаково; это свидетельствует об отсутствии влияния тепловых эффектов. Для достижения необходимого десятикратного усиления за один проход мощность накачки следует увеличить примерно в 2.5 раза, а диаметр АЭ уменьшить с 1.2 до 1 мм. При использовании такого АЭ в обычной четырехпроходной схеме стретчера ЗС будет усилен приблизительно в 10^4 раз (до 1 мДж). Частота следования импульсов при этом может составлять 1–20 кГц при сохранении энергии в импульсе.

Для достижения необходимого усиления может использоваться регенеративный усилитель. Несмотря на некоторые недостатки (плохой контраст и недостаточная стабильность) по сравнению с многопроходным усилителем, именно принцип регенеративного усиления наиболее часто используют для существенного усиления энергии в импульсе после волоконных источников импульсов.

На основе АЭ в виде тонкого стержня был создан регенеративный усилитель, принципиальная схема которого представлена на рис.7. Для квантрона, описанного выше, собран резонатор, длина одного из плеч которого увеличена до 0.7 м за счет использования телескопической системы из отрицательной линзы и вогнутого зеркала. В резонатор установлен поляризатор и ячейка Поккельса для ввода и вывода усиливаемого излучения. Данный резонатор настроен на устойчивую генерацию одномодового излучения с выходной мощностью до 4 Вт при максимальной мощности накачки. Отметим, что основным недостатком геометрии АЭ в виде тонкого стержня является возникновение сильной тепловой линзы (в исследуемом АЭ ее фокусное расстояние составило ~ 0.5 м). Это приводит к необходимости перестройки те-

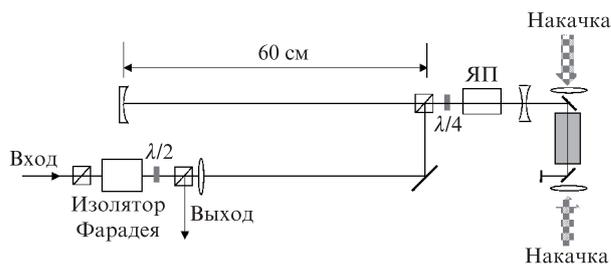


Рис.7. Схема регенеративного усилителя на основе тонкого стержня.

лескопической ветви резонатора при изменении мощности накачки.

В режиме регенеративного усиления излучение после стретчера фокусируется линзой для формирования расходимости входного сигнала, соответствующей расходимости моды резонатора. Затем один из импульсов «запирается» внутри резонатора при подаче напряжения на ячейку Поккельса, синхронизованную с фемтосекундным источником через блок управления. Число проходов усиления фиксируется фотодиодом, установленным после глухого зеркала, и может регулироваться задержкой фронта выключения напряжения на ячейке Поккельса. После второго переключения усиленный импульс выходит обратно и выводится изолятором Фарадея, установленным после стретчера.

В разработанной схеме регенеративного усиления удалось усилить энергию в импульсе после стретчера с 0.1 до 25 мкДж при 15 обходах резонатора импульсом излучения. При этом частота следования импульсов составляла 49 кГц при средней мощности излучения на выходе 1.3 Вт. Длительность усиленного импульса стала чуть меньше длительности импульса после стретчера, что объясняется «обрезанием» импульса ячейкой Поккельса из-за недостаточной длины телескопического плеча резонатора (см. рис.4, на котором приведена осциллограмма усиленного импульса, зарегистрированная фотодиодом с откликом 70 пс и осциллографом с шириной полосы пропускания 2.5 ГГц). Отметим также, что профиль усиленного импульса близок к П-образному, как и после стретчера. Сохранение такого профиля импульса очень важно при дальнейшем усилении в криогенном дисковом лазере, поскольку профиль импульса накачки определяет эффективность параметрического усиления.

Отметим, что усиление, составившее в разработанном регенеративном усилителе 250 раз, планируется увеличить до 10^4 . Основным фактором, ограничивающим усиление, стали большие потери сигнала на поляризаторе из-за деполяризации, возникающей в АЭ и ячейке Поккельса. Эти потери приводят к необходимости увеличения числа проходов излучения по усилителю, которое, в свою очередь, ограничено переходом в «непрерывный» режим генерации (начало генерации «гигантского» импульса). Деполяризация в АЭ может быть скомпенсирована пластиной $\lambda/4$, установленной между АЭ и глухим зеркалом резонатора, а деполяризация в ячейке Поккельса, вызванная, по всей видимости, ее размещением в расходящемся пучке, может быть уменьшена ее перестановкой в область более коллимированного излучения.

4. Заключение

Для построения стретчера, необходимого для новой ЗС, целесообразно использовать как голографические ДР, так и ОЧБР, поскольку они обладают большой дисперсией. В ходе работы создана программа для численного моделирования хода лучей в различных эквивалентных одно- и двухрешеточных схемах стретчера при заданных параметрах будущего решеточного компрессора. Рассчитана и экспериментально реализована схема стретчера на ДР с периодом 1200 штр./мм. Подобраны параметры оптических элементов и ДР, необходимых для построения более оптимального с точки зрения пропускания, размеров и стоимости стретчера. Согласно расчетам,

при использовании решетки с периодом 1740 штр./мм ее ширина уменьшится с 32 до 24 см, а рабочий угол падения станет ближе к углу Литтроу, что приведет к увеличению эффективности отражения в первый порядок дифракции. Экспериментально реализован стретчер на базе двух ОЧБР с четырьмя отражениями от каждой. Полученная схема значительно компактнее предыдущей и проще в юстировке.

Разработан квантрон на тонком стержне из Yb:YAG (легирование 1%) диаметром 1.2 мм и длиной 30 мм, используемый в геометрии монокристаллического волокна. На основе квантрона создан регенеративный усилитель, позволивший усилить энергию в импульсе после стретчера с 0.1 до 25 мкДж при 15 обходах резонатора импульсом излучения. При этом частота следования импульсов составляла 49 кГц при средней мощности излучения на выходе 1.3 Вт. Полученное усиление (250 раз) планируется увеличить до 10^4 за счет повышения мощности накачки.

Таким образом, нами создана новая задающая система для криогенного дискового лазера, состоящая из фемтосекундного источника, стретчера и регенеративного усилителя. После увеличения мощности накачки регенеративного усилителя выходное излучение задающей системы будет усиливаться в криогенных каскадах усиления.

Работа выполнена при поддержке программы РАН «Экстремальные световые поля и их приложения», элементная база создана за счет средств мегагранта Правительства РФ № 14.B25.31.0024, реализуемого в Институте прикладной физики РАН.

1. Перевезенцев Е.А., Мухин И.Б., Кузнецов И.И., Вадимова О.Л., Палашов О.В. *Квантовая электроника*, **44** (5), 448 (2014).
2. Brown D.C., Tornegård S., Kowalewski K., Envid V., Zembek J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8381**, 83810R-1 (2012).
3. Klingebiel S., Wandt C., Skrobol C., Ahmad I., Trushin S.A., Major Z., Krausz F., Karsch S. *Opt. Express*, **19** (6), 5357 (2011).
4. Martinez O.E. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-23** (1), 59 (1987).
5. Treacy E.B. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-5** (9), 454 (1969).
6. Naik P.A., Sharma A.K. *J. Opt. (Calcutta)*, **29** (3), 105 (2000).
7. Fiorini C., Sauteret C., Rouyer C., Blanchot N., Sezec S., Migus A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30** (7), 1662 (1994).
8. Cheriaux G. *Thes. Doct. (Orsay, Universite Paris XI, 1997)*.
9. Яковлев И.В. *Особенности системы стретчер-компрессор для параметрических усилителей циркулирующих импульсов с преобразованием частоты* (Н.Новгород, ИПФ РАН, 2013).
10. McMullen J.D. *Appl. Opt.*, **18** (5), 737 (1979).
11. Гитин А.В. *Квантовая электроника*, **38** (11), 1021 (2008).
12. Zhang Z., Yagi T., Arisawa T. *Appl. Opt.*, **36**, 3393 (1997).
13. Ross I.N., Langley A.J., Today P. *Central Laser Facility Annual Report, 1999/2000*, p. 201.
14. Collier J., Hernandez-Gomez C. *Central Laser Facility Annual Report, 2001/2002*, p. 173.
15. Cheriaux G., Walker B., Dimauro L.F., Rousseau P., Salin F., Chambaret J.P. *Opt. Lett.*, **21**, 414 (1996).
16. Öffner A. Patent 3 748 015 US (1971).
17. Jiang J., Zhang Z., Hasama T. *J. Opt. Soc. Am. B*, **19**, 678 (2002).
18. Zhang Z., Song Y., Sun D., Chai L., Sun H., Wang C. *Opt. Commun.*, **206** (1), 7 (2002).
19. Suzuki A. *Appl. Opt.*, **22**, 3943 (1983).
20. Glebov L., Smirnov V., Rotari E., Cohanoschi I., Glebova L., Smolski O., Lumeau J., Lantigua C., Glebov A. *Opt. Eng.*, **53** (5), 051514 (2014).
21. Délen X., Piehler S., Didierjean J., Aubry N., Voss A., Ahmed M.A., Graf T., Balembois F., Georges P. *Opt. Lett.*, **37** (14), 2898 (2012).
22. Zaouter Y., Martial I., Aubry N., Didierjean J., Hönninger C., Mottay E., Druon F., Georges P., Balembois F. *Opt. Lett.*, **36** (5), 748 (2011).