

УДК 681.7.069.24

Мощные импульсно-периодические лазеры со сверхкороткой длительностью импульса с прямой диодной накачкой на основе иттербиевых сред для технологических и биомедицинских применений

© 2018 г. G. N. Kim*, Ph.D.; J. Yang*, Ph.D.; B. Lee*, J. W. Kim*, Ph.D.; D. C. Neo*, Ph.D.; С. А. Чижов*, ***; Е. Г. Салль*, ***; В. Е. Яшин**, ДОКТОР ФИЗ.-МАТ. НАУК

*Korea Electrotechnology Research Institute, Ansan-si, 15588, Republic of Korea

**АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург

***В прошлом сотрудники Государственного оптического института

E-mail: vyashin@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.07.2018

DOI:10.17586/1023-5086-2018-85-11-29-38

Создан ряд фемтосекундных лазерных систем, основанных на усилении chirпированных и сверхкоротких импульсов, реализованных в широкополосных иттербиевых лазерных средах (KGW:Yb, YAG:Yb) с прямой лазерной диодной накачкой. Использование различных геометрий активных элементов в форме тонких пластин и тонких стержней позволило получить импульсы со средней мощностью излучения 10–100 Вт. Качество лазерного пучка было близко к дифракционному. Все эти параметры позволяют использовать разработанные лазерные системы в различных технологических и биомедицинских применениях, требующих высокой точности лазерного воздействия.

Ключевые слова: фемтосекундные импульсы, KGW:Yb, YAG:Yb, задающий генератор, лазерный усилитель, спектральное профилирование.

Коды OCIS: 140.3480, 140.7090

1. ВВЕДЕНИЕ

В Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова (ГОИ), а затем в институтах преемниках ГОИ (НИИ Лазерной физики, НИИ комплексных испытаний) широким фронтом велись работы в области лазеров с высокой пиковой мощностью и сверхкороткой длительностью импульса сначала для исследований в области лазерного термоядерного синтеза, а затем для генерации сверхсильных полей. Обзор этих работах представлен в публикации [1]. Разрабатываемые лазеры были основаны на использовании в качестве активной среды неодимового стекла, что позволяет получать большую энергию (сотни и тысячи джоулей) при относительно малой частоте повторения импульсов (одиночные «выстрелы») [2]. Для практического использования сверхкоротких импульсов, например, для обработки различ-

ных материалов необходимо, чтобы лазер работал с большой частотой повторения импульсов (десятки и сотни кГц). В настоящей статье описывается подход к созданию таких лазеров и приводятся примеры его реализации с учетом опыта разработок в ГОИ по мощным лазерным системам (ЛС) [1].

Мощные сверхкороткие (пико- и фемтосекундные) оптические импульсы с энергией в десятки микроджоулей и плотностью мощности излучения в фокусе объектива 10^{12} – 10^{16} Вт/см² способны вызывать абляцию различных материалов, включая металлы, полупроводники, керамику, полимеры, диэлектрики и биологические ткани. Вследствие быстрого ввода энергии в материалы сверхкороткими лазерными импульсами не происходит перегрев материалов, что устраняет их тепловое разрушение и существенно уменьшает зону перегрева.

Это позволяет проводить прецизионную обработку материалов [3–5].

Допированные иттербием кристаллы широко используются для создания фемтосекундных ЛС, поскольку обладают широкой полосой усиления, высоким поглощением излучения лазерной диодной накачки и высокой теплопроводностью в случае использования кристаллических матриц [6]. Среди допированных иттербием кристаллов калиевые вольфраматы $KY(WO_4)_2:Yb$ ($KYW:Yb$) и $KGd(WO_4)_2:Yb$ ($KGW:Yb$) обладают набором привлекательных спектрально-люминесцентных, оптических и механических параметров, что создает предпосылки их применения в разработке фемтосекундных ЛС, работающих на длине волны около 1 мкм [7]. Ширина полосы усиления $KGW:Yb/KYW:Yb$ достаточна для генерации суб-100 фс импульсов [8, 9], которые обычно удлиняются при усилении до 300–400 фс [10, 11] из-за эффекта регенеративного сужения спектра [12]. Этот эффект можно частично подавить, используя среды с увеличенной частотной полосой усиления. Кристаллы $KGW:Yb/KYW:Yb$ с различной ориентацией оптических осей, например с ориентациями N_g и N_p , позволяют увеличить полосу усиления [13]. Другой путь расширения спектральной полосы усиления состоит в применении спектральных фильтров, вносящих контролируемые потери в максимуме полосы усиления [14].

Кристаллы $KGW:Yb/KYW:Yb$ обладают относительно низкой теплопроводностью по сравнению с другими кристаллическими матрицами, что ограничивает среднюю мощность излучения лазеров на $KGW:Yb/KYW:Yb$ вследствие терморазрушения активных элементов (АЭ) [2]. Поэтому для увеличения средней мощности лазеров на кристаллах $KGW:Yb$ целесообразно использовать дополнительные усилители на других кристаллических средах, таких, например, как $YAG:Yb$, $Y_2O_3:Yb$ с центральной длиной полосы усиления, близкой к 1035 нм — как у $KGW:Yb/KYW:Yb$.

В данной, во многом обзорной, статье описывается конструкция и приводятся параметры основной фемтосекундной ЛС на кристаллах $KGW:Yb$ с выходной мощностью до 15 Вт, которая затем была увеличена дополнительными усилительными модулями до 100 Вт.

2. ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ $KGW:Yb$ С ВЫСОКОЙ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ

Фемтосекундная ЛС была построена по принципу усиления chirпированных импульсов [15]. Этот принцип, основанный на усилении относительно длинного лазерного импульса с его последующим сжатием в дисперсионной линии задержки, позволяет подавить нелинейные процессы (оптический пробой, самофокусировка) и существенно увели-

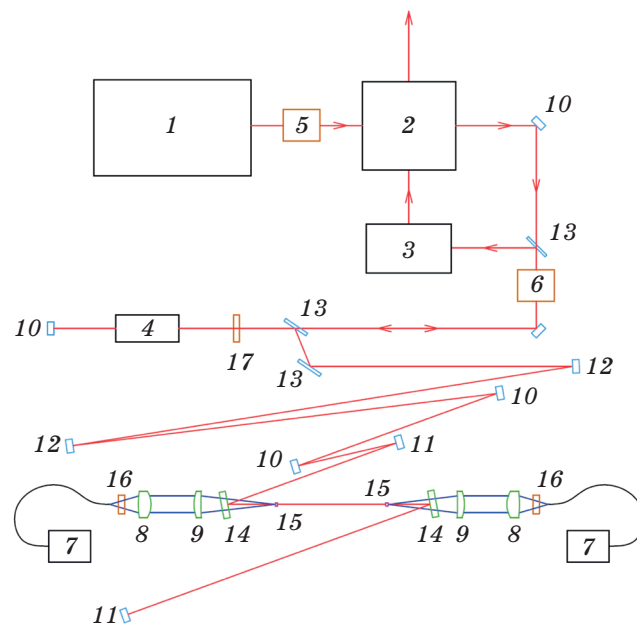


Рис. 1. Схема фемтосекундной ЛС [16]. 1 — фемтосекундный ЗГ, 2 — стретчер-компрессор, 3 — пикер (дополнительная ячейка Поккельса), 4 — ячейка Поккельса регенеративного усилителя, 5 — изолятор Фарадея, 6 — фарадеевский вращатель поляризации, 7 — лазерные диодные линейки, 8 — коллимирующие линзы, 9 — фокусирующие линзы, 10 — плоские зеркала, 11, 12 — вогнутые зеркала, 13 — тонкопленочные поляризаторы, 14 — дихроичные зеркала, 15 — лазерные кристаллы, 16 — полуволновые фазовые пластинки, 17 — четвертьволновая фазовая пластинка.

чить выходную энергию. Система, схема которой приведена на рис. 1, состоит из фемтосекундного задающего генератора (ЗГ) с АЭ на кристалле $KGW:Yb$, модуля стретчер-компрессор на основе единой дифракционной решетки, спектрального селектора на основе интерференционно-поляризационного фильтра (фильтр Лию) и регенеративного усилителя (РУ), имеющего два усилительных модуля с диодной накачкой на кристалле $KGW:Yb$ с расширенной частотной полосой усиления [16]. Система также включает два фарадеевских изолятора: один для защиты ЗГ от усиленного излучения и второй для вывода излучения после РУ. Для увеличения временного контраста выходных импульсов относительно пред- и постимпульсов в состав системы включена дополнительная ячейка Поккельса (пикер) с высококачественными тонкопленочными поляризаторами. Далее описываются основные элементы и подсистемы данной ЛС.

2.1. Задающий генератор с самосинхронизацией аксиальных мод

Оптическая схема ЗГ представлена на рис. 2. В качестве АЭ использован кристалл KGW размером $3 \times 3 \times 2$ мм, активированный 5% Yb^{3+} , торцы которого были просветлены как для лазерного излучения, так и для излучения накачки. Исполь-

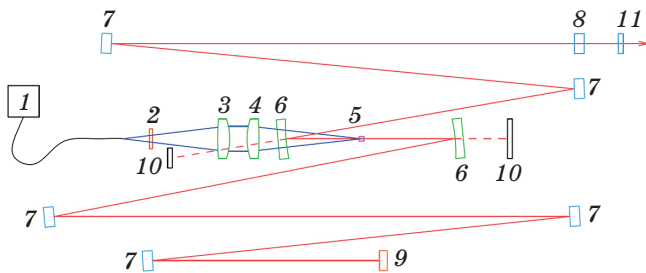


Рис. 2. Схема ЗГ на KGW:Yb с лазерной диодной накачкой [17]. 1 — лазерный диод, 2 — полуволновая фазовая пластинка, 3 — коллимирующая линза, 4 — фокусирующая линза, 5 — лазерный кристалл, 6 — дихроичные зеркала, 7 — резонаторные зеркала, 8 — выходное зеркало, 9 — высокоотражающее зеркало или полупроводниковый насыщающийся поглотитель на зеркале, 10 — поглотители, 11 — полуволновая пластинка.

зовались кристаллы с разной ориентацией оптических осей, N_g и N_p , относительно направления распространения лазерного пучка, обладающие разными спектрально-люминесцентными характеристиками. Пучок накачки от 8-ваттной InGaAs лазерной линейки с 105-мкм волоконным выводом (0,11 NA) сначала коллимировался ахроматическим дублетом (3) с фокусным расстоянием $F = 60$ мм, а затем фокусировался в лазерный кристалл (5) другим ахроматическим дублетом (4) с $F = 60$ мм через дихроичное зеркало (6) с пропусканием 95% для излучения накачки. С целью получения минимальной длительности спектрально-ограниченного импульса дисперсия элементов лазерного резонатора компенсировалась тремя чирпированными зеркалами, вносящими дисперсию групповой скорости -1350 фс². Другие детали оптической схемы лазера описаны в статьях [9, 17].

Как хорошо известно, для получения максимальной эффективности лазера с диодной накачкой размер резонаторной моды в АЭ должен быть максимально хорошо согласован с размером пучка накачки. Такое согласование сначала численно моделировалось, а затем достигалось путем сдвига лазерного кристалла вдоль продольной оси.

Также оптимизировался коэффициент отражения выходного зеркала. На рис. 3а приведены зависимости выходной мощности в непрерывном режиме генерации от коэффициента пропускания выходного зеркала, из которой следует, что оптимальный коэффициент пропускания лежит в пределах 4–6%. На рис. 3б представлены зависимости выходной мощности от мощности накачки, показывающие, что лазер имеет достаточно высокую дифференциальную эффективность и обеспечивает выходную мощность более 1 Вт.

Пассивная синхронизация продольных мод достигалась заменой «глухого» зеркала (рис. 2, 9) на зеркало с полупроводниковым насыщающимся поглотителем. На рис. 4 приведены спектры и

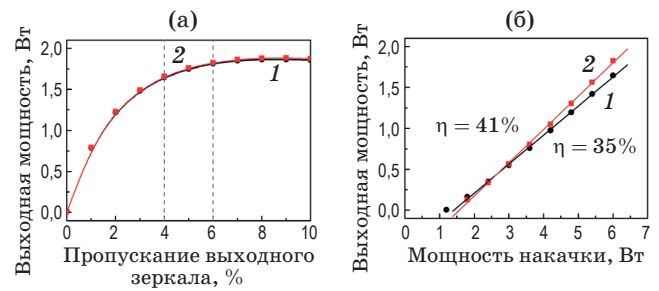


Рис. 3. Выходная мощность лазера на лазерных кристаллах с ориентацией N_g (1) и N_p (2) в непрерывном режиме в зависимости от пропускания выходного зеркала (а) и в зависимости от мощности накачки (б). η — дифференциальная эффективность. [16]

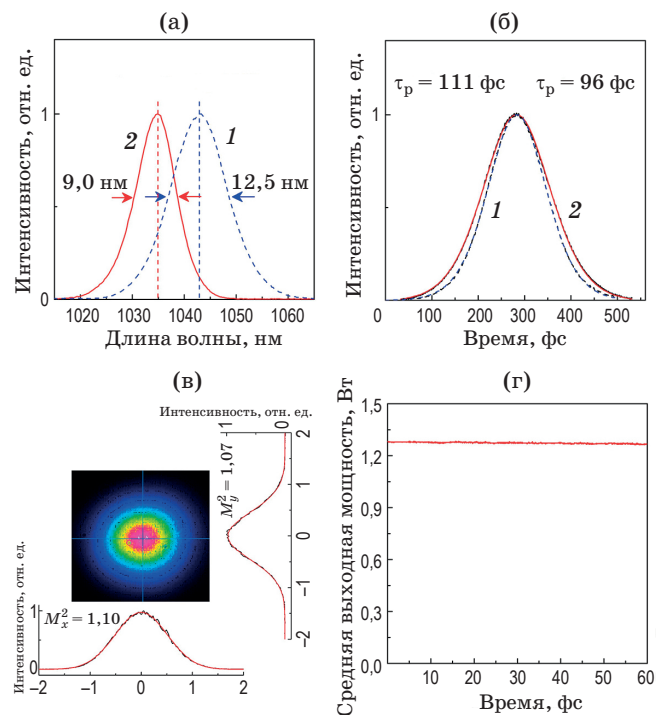


Рис. 4. Оптические спектры (а) и автокорреляционные функции (б) импульсов с центральной длиной волны $\lambda_c = 1043$ нм и длительностью $\tau_p = 96$ фс, ориентация N_g (1), и импульсов с $\lambda_c = 1035$ нм и $\tau_p = 111$ фс, ориентация N_p (2). Фотография пучка и соответствующие профили интенсивности (в). Измеренная средняя мощность и ее временная стабильность (г) [17].

автокорреляционные функции генерируемых импульсов кристаллов с ориентациями N_g и N_p (поляризация лазерного излучения направлена вдоль осей N_p и N_m соответственно). Как видно из представленных данных, при различных ориентациях кристаллов генерируются импульсы немного разной длительности ($\tau_p \approx 100$ фс) с различающимися спектрами. Произведение ширины спектра на длительность импульса составило 0,308, что близко к этому значению для спектрально-ограниченного импульса с временной формой, описываемой функцией sech^2 . Это показывает, что дисперсия

Таблица 1. Сравнение лазеров на основе кристаллов KGW:Yb ориентацией N_g и N_p с самосинхронизацией аксиальных мод и выходными зеркалами, имеющими коэффициент пропускания 4 и 6% соответственно [17]

Лазеры	λ_c , нм	$\Delta\lambda$, нм	Выходная мощность, Вт	τ_p , фс	M^2	Стабильность выходной мощности, %	Стабильность положения пучка, %	Угловая стабильность, %
$E//N_p$, ОС = 4%	1043	12,5	0,64	96	1,10 (x) 1,25 (y)	0,30	0,5 (x) 3,2 (y)	0,3 (x) 1,9 (y)
$E//N_m$, ОС = 6%	1035	9,0	1,27	111	1,10 (x) 1,07 (y)	0,14	0,1 (x) 0,15 (y)	0,2 (x) 0,3 (y)

Примечание. ОС — коэффициент пропускания выходного зеркала резонатора, $\Delta\lambda$ — ширина спектра, $E//N_p$, $E//N_m$ — вектор электрического поля // оптические оси кристалла KGW:Yb.

в элементах резонатора достаточно хорошо компенсирована.

Типичный профиль лазерного пучка на расстоянии 1 м от выходного зеркала представлен на рис. 4в. Профиль пучка близок к гауссову с размерами 1,02 мм по горизонтали и 0,92 мм по вертикали. Параметр M^2 , характеризующий качество лазерного пучка, составляет 1,1 в горизонтальном направлении и 1,07 в вертикальном, показывая, что угловая расходимость лишь незначительно превышает дифракционную.

Рисунок 4г демонстрирует стабильность выходной мощности лазера на протяжении 1 ч. Максимальная средняя мощность достигала 1,27 Вт при частоте следования импульсов 87,8 МГц, что дает энергию одного импульса 14 нДж. Стабильность выходной мощности соответствовала 0,14%.

В заключении, в табл. 1 проведено сравнение параметров лазеров на основе кристаллов KGW:Yb с ориентациями N_g и N_p . Приведенные параметры показывают, что лазер на кристалле с ориентацией N_p создает более стабильное излучение с большей мощностью на центральной длине волны (λ_c), более подходящей для дальнейшего усиления в РУ.

2.2. Стретчер-компрессор

Оптический стретчер, осуществляющий удлинение исходного сверхкороткого импульса во времени, и компрессор, сжимающий его после усиления, являются ключевыми элементами ЛС с усилением chirпированных импульсов [18]. Конструкция стретчера должна обеспечивать максимально возможную длительность выходного импульса (степень растяжения импульса во времени более 1000), а также хорошее качество лазерного пучка и лазерного импульса при минимальных размерах модуля. Те же требования предъявляются и к компрессору: степень сжатия должна быть близка к степени растяжения импульса в стретчере. Для увеличения эффективности всей системы в целом и уменьшения ее размеров в нашей конструкции стретчера-компрессора использовался единый модуль с общей пропускающей дифракционной решеткой и складывающимися луч зеркалами (рис. 5) [19].

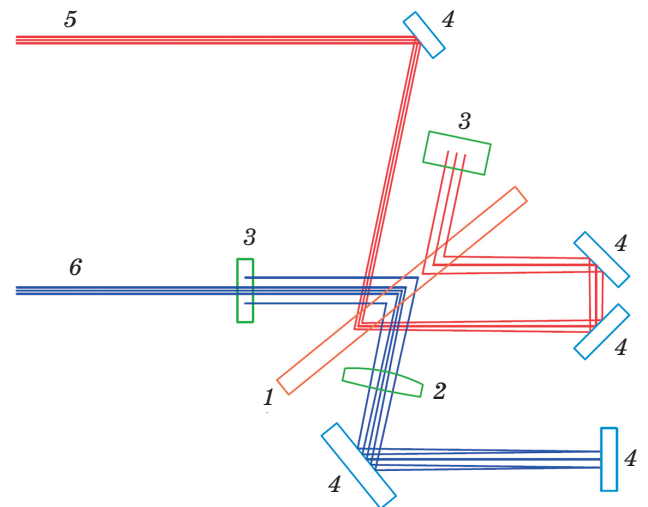


Рис. 5. Оптическая схема модуля стретчер-компрессор на основе пропускающей дифракционной решетки (1), сферической линзы (2), призмы (3) и складывающихся зеркала (4). Лазерный пучок на входе компрессора (5), лазерный пучок на входе стретчера (6) [19].

В стретчере и компрессоре пучок четыре раза проходит через решетку. После первого и третьего проходов в стретчере он фокусируется и коллимируется сферической линзой 2. Для того чтобы иметь возможность изменять длительность растянутого импульса использовались дифракционные решетки с плотностью штрихов 1700 и 1500 mm^{-1} и две сферические линзы с фокусными расстояниями 100 и 200 мм соответственно. Длительности растянутого импульса составляли 300 и 50 пс. Длительность скомпенсированного импульса менялась от 230 до 270 фс, что говорит о наличии aberrаций в стретчере, а также о виньетировании пучка. Для устранения этих эффектов необходимо устанавливать асферизированную или зеркальную оптику, а также элементы с большой апертурой, что влечет за собой увеличение размеров и стоимости модуля. Измерения профиля пучка, проведенные с использованием цифровой фотокамеры на ПЗС, показали, что модуль стретчер-компрессор не ухудшает качество лазерного пучка.

Для сохранения стабильности работы модуля его корпус охлаждался, что предотвращало нагрев механической конструкции поглощенным лазерным излучением и изменение его геометрических параметров вследствие теплового расширения [19].

2.3. Спектральное профилирование излучения

Для получения на выходе ЛС достаточно энергетических импульсов микро- и миллиджоульного уровня их необходимо существенно (более 100 раз) усилить. При этом, как хорошо известно [6], происходит существенное сужение спектра, а с ним и увеличение длительности сжимаемого импульса. Для смягчения влияния этого эффекта проведено спектральное профилирование, основанное на использовании поляризационно-интерференционного фильтра (фильтр Лию). Ранее эта техника устанавливалась в титан-сапфировом лазере [14]. Фильтр Лию представляет собой двулучепреломляющую кварцевую пластинку, помещенную между двумя поляризаторами. Для реализации оптимального спектрального профилирования минимум пропускания фильтра должен совпадать с максимумом полосы усиления лазерного кристалла, а ее ширина должна быть близка к ширине контура усиления. Для выполнения этих условий использовалась кварцевая пластинка толщиной 8 мм, вырезанная вдоль оптической оси.

2.4. Двухэлементный регенеративный усилитель

Максимальная средняя мощность твердотельных лазеров ограничена либо термическим разрушением АЭ, либо термооптическими аберрациями [2, 17, 20]. Одним из методов увеличения средней мощности объемных лазерных сред является увеличение длины среды или использование нескольких АЭ. Для увеличения средней мощности при одновременном сохранении высокого качества усиливаемых лазерных пучков была реализована схема усилителя с двумя АЭ (см. также [16, 19, 21]). Оптическая схема лазерного усилителя с двумя АЭ из $KGW:Yb$ с различными ориентациями оптических осей приведена на рис. 1. Использование кристаллов с ориентациями N_p и N_g , имеющих различные спектрально-люминесцентные характеристики при соответствующих ориентациях вектора поляризации усиливаемого лазерного пучка, позволяет расширить частотную полосу усиления и таким образом генерировать или усиливать широкополосные chirпированные или фемтосекундные импульсы. Кристаллы с 3%-содержанием иттербия имели длину 5 мм и поглощали более 70% мощности накачки [16]. Аналогично ЗГ пучки накачки и размеры моды резонатора РУ были максимально согласованы в объеме лазерных кристаллов. Источниками накачки служили

две лазерные диодные линейки с волоконным выводом излучения максимальной мощностью 70 Вт каждая. Пучки накачки с выхода волокна коллимировались и фокусировались через дихроичное зеркало в объем АЭ в пятно диаметром 320 мкм, близким к диаметру моды резонатора.

Этот лазер являлся и независимым генератором, и РУ. В качестве выходного зеркала в генераторе использован тонкопленочный поляризатор в сочетании с четвертьволновой фазовой пластинкой, вращением которой можно получать максимальную выходную мощность при данной мощности накачки. В качестве электрооптического затвора применялась ячейка Поккельса на основе кристалла бета-бората бария, управляемая специальным драйвером. Частота повторения импульсов ячейки могла плавно меняться от одиночных импульсов до 500 кГц.

Первоначально полученная максимальная выходная мощность лазера в непрерывном режиме составляла 18,5 Вт при мощности накачки 72 Вт, что дает 25% общей эффективности и 35% дифференциальной эффективности. Ширина спектра генерации не превышала 1 нм, а спектр центрировался на длине волны 1035 нм.

В дальнейшем лазер оптимизировался путем лучшего согласования пучков накачки и моды резонатора в лазерных кристаллах при высокой мощности накачки [22, 23]. Это достигалось перемещением зеркала 11 (рис. 1) вдоль оптической оси. Для подавления термооптических эффектов толщина лазерных кристаллов была уменьшена с 2 до 1,2 мм. Результаты оптимизации представлены на рис. 6. После оптимизации выходная мощность увеличилась на 32% — с 18,5 до 24,5 Вт при падающем на кристаллы излучении накачки мощностью 110 Вт.

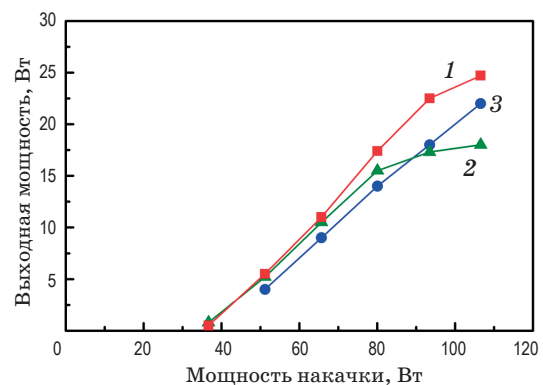


Рис. 6. Выходная мощность лазера в зависимости от мощности накачки при частоте повторения импульсов 200 кГц и различных ориентациях лазерных кристаллов (N_g и N_p) в усилителе [22]. Кристаллы при оптимизации выходной мощности (дифференциальная эффективность 50%) — 1, без оптимизации — 2, при оптимизации выходной мощности (дифференциальная эффективность 45%) — 3.

Измерения, выполненные с помощью цифровой фотокамеры, показали, что лазер обеспечивал достаточно хорошее качество пучка. Параметр M^2 изменялся от 1,14 при выходной мощности 15 Вт до 1,5 при мощности 22 Вт. Это обстоятельство позволило надеяться на хорошее качество пучка при использовании лазера как РУ чирпированных импульсов.

3. ПАРАМЕТРЫ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛАХ KGW:Yb

Когда описанный выше лазер запитывался чирпированным импульсом после стретчера, исследовались выходная мощность, спектр и качество выходного излучения, а также длительность импульса в различных условиях. Измерения показали, что, когда время открытия ячейки Поккельса увеличивалось до 400 нс (24 двойных прохода по резонатору), выходная мощность после РУ увеличивалась до 21 Вт. При дальнейшем увеличении количества проходов происходило насыщение выходной мощности: усиление компенсировалось потерями. Рисунок 7 демонстрирует практически линейную зависимость выходной мощности от мощности накачки. Кроме этого было проведено измерение выходной мощности при использовании спектрального фильтра Лио. Измерения показали, что потери мощности составляют 5% в случае использования фильтра вне резонатора. Более серьезные потери вносят дополнительная ячейка Поккельса (пикер) и компрессор, составляющие 25%, уменьшая выходную мощность до 15 Вт [22].

Лазерная система способна работать при частоте следования импульсов в диапазоне 50–500 кГц. В этом диапазоне частот выходная мощность почти не зависит от частоты повторения. Измеренная выходная энергия одиночного импульса изме-

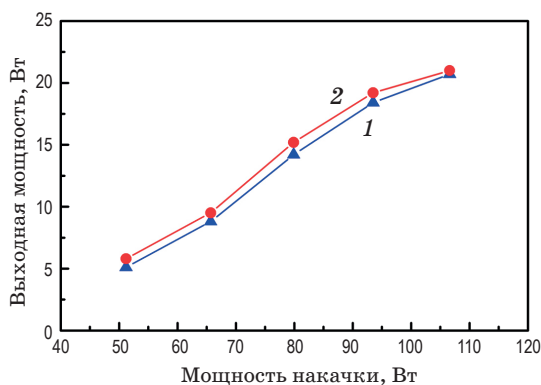


Рис. 7. Выходная средняя мощность излучения после регенеративного усилителя, работающего на частоте 200 кГц, в зависимости от мощности накачки при продолжительности открытия ячейки Поккельса 400 (1) и 500 нс (2) [22].

нялась от 300 до 30 мкДж при частотах повторения 50 и 500 кГц соответственно. Максимальная энергия на частоте 50 кГц ограничивалась возбуждением рамановского рассеяния в кристаллах KGW:Yb, которое наблюдалось в экспериментах [21, 24]. Форма сжатого импульса на этой частоте повторения искажалась из-за фазовой самомодуляции на керровской нелинейности в лазерных кристаллах [24].

Форма спектра выходного излучения при равных мощностях накачки на обоих лазерных кристаллах представлена на рис. 8а. Как видно из рисунка, весьма заметен эффект усилительного сужения спектра: ширина спектра по полувысоте примерно в 1,5 раза уже ширины спектра ЗГ. При сжатии такого импульса получается импульс длительностью 265 фс, как это видно на рис. 8в.

Этот эффект сужения спектра может быть частично подавлен, например, при неравных мощностях накачки в двух кристаллах KGW:Yb [13]. Для проверки этого было изменено соотношение мощностей накачки на кристаллах с ориентациями N_p и N_g как 3:2 [25]. Измерения показали, что спектр становится шире, а его форма существенно изменяется. Ширина спектра по полувысоте составила 11 нм, а длительность импульса около 200 фс. Недостатком этого метода является ограничение мощности на одном из кристаллов, что влечет за собой уменьшение выходной мощности. Например, в наших экспериментальных условиях мощность уменьшилась на 37%.

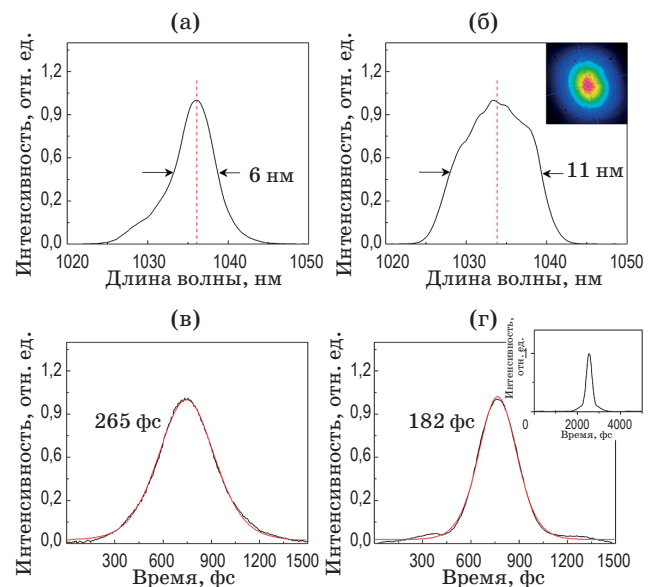


Рис. 8. Спектры (а, б) и автокорреляционные функции (в, г) (черные кривые — экспериментальные данные, красные — приближения) выходных импульсов при мощности накачки 67 Вт и частоте повторения импульсов 200 кГц без спектрального профилирования (а, в) и с профилированием (б, г). На вставках — профиль пучка (б) и автокорреляционная функция во временном диапазоне 5 пс (г) [16].

Другой путь подавления сужения спектра, как это обсуждалось ранее, заключается в использовании спектрального профилирования. Пример выходного спектра в случае установки фильтра Лио вне резонатора представлен на рис. 86. Оптический спектр имеет характерную колоколообразную форму с шириной по полувысоте 11 нм. Такой спектр передает гладкий выходной импульс с шириной автокорреляционной функции 305 фс, что соответствует длительности импульса по полувысоте 182 фс в предположении формы импульса sech^2 . Эта длительность импульса близка к 162 фс — длительности, определяемой абберациями стретчера.

При внесении спектрального селектора внутрь резонатора РУ получилась примерно такая же ширина спектра при падении мощности на 20%, связанном с накапливающимися потерями. Таким образом, комбинация спектрального фильтра вне резонатора и равной мощности накачки в лазерных кристаллах в двухэлементном РУ создает оптимальные условия для получения максимальной выходной мощности при минимальной длительности импульса.

Параметр качества M^2 выходного лазерного пучка был менее 1,2 при выходной мощности менее 12 Вт, что позволяет фокусировать пучок в пятно малого размера (5–10 мкм) и получать плотность мощности излучения в фокусе 10^{13} – 10^{14} Вт/см² при большой частоте повторения импульса. Таких плотностей вполне достаточно для абляционной микрообработки различных материалов.

4. ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ УСИЛЕНИЕ ЧИРПИРОВАННЫХ И ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Дополнительное усиление сверхкоротких лазерных импульсов было реализовано в усилителях на тонких стержнях диаметром около 1 мм, изготовленных из лазерных кристаллов YAG:Yb. Использование этих термопрочных кристаллов небольшого диаметра позволяет существенно увеличить мощность накачки, а с ней и мощность лазерного излучения [26–28]. Кроме того, центральная длина волны усиления YAG:Yb (1030 нм) близка к длине волны усиления KGW:Yb, что позволяет усиливать излучение нашего лазера. В качестве такого лазера использовался как ЗГ, так и вся ЛС на KGW:Yb.

Схема экспериментальной установки с тремя усилителями на тонком стержне приведена на рис. 9. Здесь под фемтосекундным генератором понимается как описанный выше ЗГ на KGW:Yb, так и ЛС с РУ.

В качестве АЭ усилителей использовались стержни из YAG:Yb с 1%-содержанием Yb трех размеров: стержень диаметром 1 и длиной 40 мм (усилительный модуль *Taranis* от компании *Fiber-crysl*), стержень диаметром 0,8 и длиной 30 мм (изготовлен Институтом прикладной физики РАН) и конусный стержень диаметром 0,3 с узкого конца и длиной 30 мм (ИПФ РАН). Лазерные стержни накачивались лазерными диодными модулями с волоконным выходом диаметром 105 или 200 мкм с числовой апертурой 0,22 и максимальной

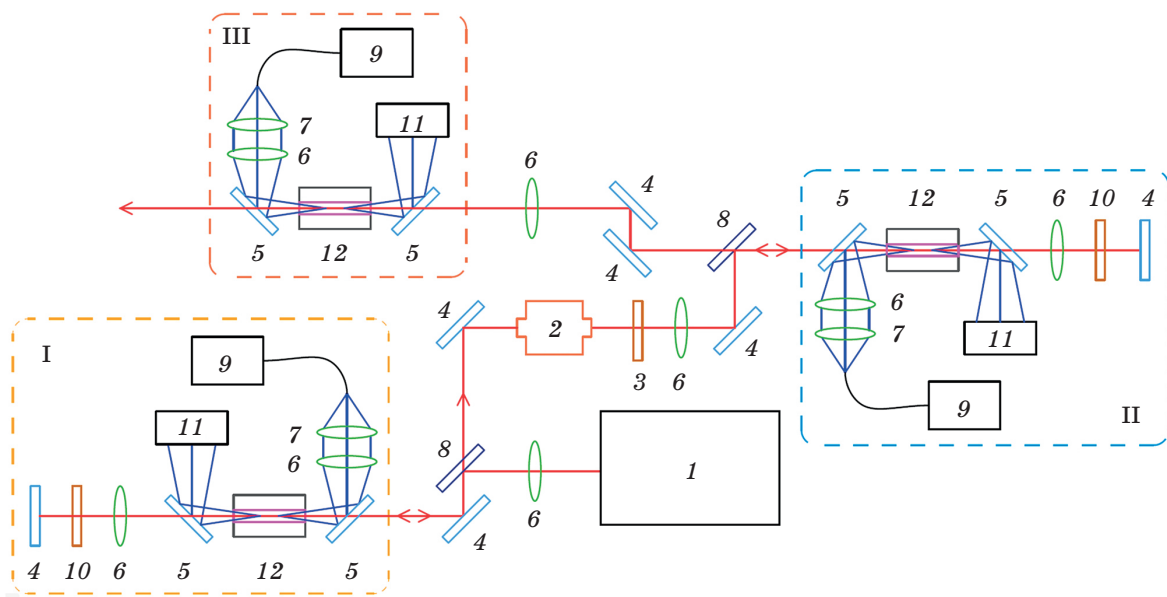


Рис. 9. Схема ЛС с усилителем на тонком стержне. I — первый, II — второй двухпроходовые каскады усиления, III — третий однопроходовой каскад усиления на основе тонких стержней. 1 — задающий лазер-генератор, 2 — изолятор Фарадея, 3 — полуволновая пластинка, 4 — высокоотражающие зеркала, 5 — длинноволновый фильтр, 6 — фокусирующие линзы, 7 — коллимирующие линзы, 8 — тонкопленочные поляризаторы, 9 — лазерные диодные линейки накачки, 10 — четвертьволновая фазовая пластинка, 11 — поглотители, 12 — тонкие стержневые АЭ.

Таблица 2. Параметры излучения после усилителей на тонких стержнях из YAG:Yb

Количество усилительных каскадов	1	1	2	3	1
Источник затравочного излучения	выход РУ	ЗГ			
		KGW:Yb	KGW:Yb	KGW:Yb	волоконный
Средняя мощность затравочного излучения, Вт	14	1,2	1,2	1,2	0,12 1030 нм 12 нм
Выходная средняя мощность, Вт	46***	14,7	60,1	110	13,3
Мощность накачки, Вт	107	137	137 + 154	137 + 154 + 176	121,5
Частота следования импульсов, МГц	0,2	79,4	79,4	79,4	30
λ_c , нм	1034	1030	1030	1030	1030
$\Delta\lambda$, нм	11	3,1	2,5	2,4	1,7
Длительность сжатого импульса, фс	280	370* 300**	620* 500**	580	—

Примечание. * — chirпированный импульс, ** — оптимизированный импульс при компенсации chirпа, *** — выходная мощность перед компрессором.

мощностью 150 Вт. Излучение накачки фокусировалось в АЭ парой линз таким образом, чтобы изображение конца волокна передавалось в АЭ.

Излучение от генератора дважды проходило по АЭ и выводилось из схемы усиления с использованием фарадеевского вращателя. Для разделения излучения накачки на длине волны 940 нм и усиливаемого излучения применялся длинноволновый фильтр. Коротковолновый фильтр использовался в качестве поляризатора. Между двумя усилительными каскадами помещался фарадеевский изолятор, предотвращающий самовозбуждение усилителей.

В табл. 2 приведена сводка результатов по параметрам излучения, полученным при использовании усилителей на тонких стержнях из YAG:Yb. Как видно из таблицы, несколько каскадов усиления позволяют получить среднюю мощность излучения до уровня, превышающего 100 Вт. Это можно сделать не только с помощью ЗГ на KGW:Yb (4-я колонка таблицы), но также и иттербиевого волоконного лазера с самосинхронизацией мод (5-я колонка). В режиме насыщения эффективность съема мощности с усилителя достигает 30% (1-я колонка таблицы). При большом коэффициенте усиления происходит рассмотренное выше сужение спектра и увеличение длительности сжатого импульса примерно до 500 фс.

Наибольшая выходная мощность 110 Вт достигалась при трехкаскадном усилении. Зависи-

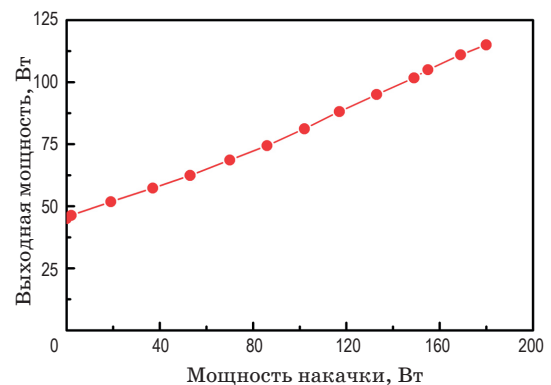


Рис. 10. Выходная мощность излучения после третьего каскада усиления.

мость выходной мощности этой усилительной системы от мощности накачки демонстрируется рис. 10.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, был разработан и создан мощный импульсный двухэлементный KGW:Yb-лазер с лазерной диодной накачкой, работающий как в моноимпульсном режиме, так и как широкополосный РУ. Использование этого РУ совместно с ЗГ и другими подсистемами позволило создать компактную мощную (15 Вт) фемтосекундную (182 фс)

ЛС с высокой яркостью излучения ($M^2 < 1,2$), способную работать с большой частотой повторения импульсов (50–500 кГц).

Использование дополнительных усилителей на основе тонких стержней YAG:Yb позволило существенно увеличить среднюю мощность излучения до уровня более 100 Вт при небольшом увеличении длительности импульса из-за эффекта регенеративного сужения спектра.

Достигнутый уровень лазерных параметров позволяет использовать этот фемтосекундный лазер в различных целях, включая прецизионную субмикронную обработку различных материалов для структурирования поверхности, изготовления фотонных и биомедицинских устройств, фотовольтаики и изготовления дисплеев.

Эта работа была поддержана программой первичных исследований Корейского научно-исследовательского электротехнологического института через Национальный Научно-исследовательский Совет науки и технологии (NST), финансируемой Министерством науки, ICT и будущего планирования (MSIP) (№18-12-N0101-41). (This work was supported by the Korea Electrotechnology Research Institute Primary research program through the National Research Council of Science & Technology (NST) funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning (MSIP) (No. 18-12-N0101-41)).

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института прикладной физики РАН О.В. Палашову, И.Б. Мухину и И.И. Кузнецову за изготовление АЭ и обсуждение результатов экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яшин В.Е. Исследования и разработки в области оптики твердотельных лазеров с высокой пиковой мощностью излучения в ГОИ им. С.И. Вавилова // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 4. С. 55–70.
2. Мак А.А., Сомс Л.Н., Фромзель В.А., Яшин В.Е. Лазеры на неодимовом стекле. М.: Наука, 1990. 288 с.
3. Dausinger F., Lichtner F., and Lubatschowski H. Femtosecond technology for technical and medical applications. Berlin: Springer, 2004. 327 p.
4. Diels J.-C. and Rudolph W. Ultrashort laser-pulse phenomena: Fundamentals, techniques, and applications on femtosecond time scale. Boston: Academic Press, 2006. 608 p.
5. Fermann M.E., Galvanauskas A., and Sucha G. Ultrafast lasers: Technology and applications. N.Y.: Marcel Dekker, 2003. 784 p.
6. Druon F., Balembois F., Georges P. New materials for short-pulse amplifiers // IEEE Photonics J. 2011. V. 3. P. 268–272.
7. Kuleshov N.V., Lagatsky A.A., Podlipensky A.V., Mikhailov V.P., Huber G. Pulsed laser operation of Yb-doped KY(WO₄)₂ and KGd(WO₄)₂ // Opt. Lett. 1997. V. 22. P. 1317–1319.
8. Paunescu G., Hein J., and Sauerbrey R. 100-fs diode-pumped Yb:KGW mode-locked laser // Appl. Phys. 2004. V. B79. P. 555–557.
9. Kim G.H., Kang U., Heo D., Yashin V.E., Kulik A.V., Sall E.G., and Chizhov S.A. A compact femtosecond generator based on an Yb:KYW crystal with direct laser-diode pumping // J. Opt. Technol. 2010. V. 77. P. 225–229.
10. Liu H., Nees J., Mourou G., Biswal S., Spuehler G.J., Keller U., and Kuleshov N.V. Yb:KGd(WO₄)₂ chirped-pulse regenerative amplifiers // Opt. Commun. 2002. V. 203. P. 315–321.
11. Nickel D., Stolzenburg C., Giesen A., and Butze F. Ultrafast thin-disk Yb:KY(WO₄)₂ regenerative amplifier with a 200-kHz repetition rate // Opt. Lett. 2004. V. 29. P. 2764.
12. Raybaut P., Balembois F., Druon F., and Georges P. Numerical and experimental study of gain narrowing in ytterbium-based regenerative amplifiers // IEEE J. Quantum Electron. 2005. V. 41. P. 415–426.
13. Buenting U., Sayinc H., Wandt D., Morgner U., and Kracht D. Regenerative thin disk amplifier with combined gain spectra producing 500 mJ sub 200 fs pulses // Opt. Exp. 2009. V. 17. P. 8046–8050.
14. Barty C., Korn G., Raksi F., Rose-Petruck C., Squier J., Tian A., Wilson K., Yakovlev V., and Yamakawa K. Regenerative pulse shaping and amplification of ultrabroadband optical pulses // Opt. Lett. 1996. V. 21. P. 219–221.
15. Strickland D. and Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses // Opt. Commun. 1985. V. 56. P. 219–221.
16. Kim G.H., Yang J., Chizhov S.A., Sall E.G., Kulik A.V., Yashin V.E., Lee D.S., and Kang U. High average-power ultrafast CPA Yb:KYW laser system with dual-slab amplifier // Opt. Exp. 2012. V. 20. P. 3434–3442.
17. Kim G.H., Yang J., Sall E., Chizhov S., Kulik A., Lee D.S., Kang U., Yashin V. Development of compact femtosecond Yb:KYW oscillators: Simulation and experiment // J. Korean Phys. Soc. 2012. V. 61. P. 365–370.
18. Андреев А.А., Мак А.А., Яшин В.Е. Генерация и применение сверхсильных лазерных полей // Квант. электрон. 1997. Т. 24. С. 99–114.
19. Kim G.H., Yang J., Lee B., Bosu J., Sall E., Chizhov S., Yashin V., Kang U. High-power diode-pumped short pulse lasers based on Yb:KGW crystals for industrial applications // Chapter 2 in book “High Energy and Short Pulse Lasers”. Ed. by Viskup R. / Rijeka, Croatia: In Tech, 2016. P. 33–53. Intech. <http://dx.doi.org/10.5772/64571>

20. *Koechner W.* Solid-state laser engineering. N.Y.: Springer, 2006. 747 p.
21. *Ким Г.Х., Янг Ч., Лу Д.С., Кулик А.В., Салль Е.Г., Чижов С.А., Яшин В.Е., Канг У.* Мощные и эффективные лазеры на объемных кристаллах Yb:KYW с продольной лазерной диодной накачкой, работающие в непрерывном и импульсных режимах // Квант. электрон. 2012. Т. 42. № 4. С. 292–297.
22. *Kim G.H., Yang J., Chizhov S.A., Sall E.G., Kulik A.V., Yashin V.E., Kang U.* High brightness Q-switched oscillator and regenerative amplifier on dual-crystal Yb:KGW laser // Laser Phys. Lett. 2013. V. 10. P. 125004–125008.
23. *Kim G.H., Yang J., Chizhov S.A., Sall E.G., Kulik A.V., Yashin V.E., Kang U.* High-power directly diode-pumped femtosecond Yb:KGW lasers with optimized parameters // Proc. SPIE. 2014. V. 8959. P. 8959B-1–8959B-8.
24. *Kim G.H., Yang J., Yashin V.E., Kulik A.V., Sall E.G., Chizhov S.A., Kang U.* Power limitation and pulse distortions in Yb:KGW laser system with chirped pulse amplification // Quantum Electron. 2013. V. 43. P. 725–730.
25. *Kim G.H., Yang J.H., Lee D.S., Кулик А.В., Саль Е.Г., Чижов С.А., Яшин В.Е., Канг У.* Фемтосекундный лазер на кристаллах Yb:KYW с подавлением сужения спектра в регенеративном усилителе путем спектрального профилирования импульса // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 3. С. 22–29.
26. *Markovic V., Rohrbacher A., Hofmann P., Pallmann W., Pierrot S., and Resan B.* 160 W 800 fs Yb:YAG single crystal fiber amplifier without CPA // Opt. Exp. 2015. V. 23. P. 25883–25888.
27. *Lesparre F., Gomes J.T., Délen X., Martial I., Didierjean J., Pallmann W., Resan B., Druon F., Balembois F., and Georges P.* Yb:YAG single-crystal fiber amplifiers for picosecond lasers using the divided pulse amplification technique // Opt. Lett. 2016. V. 41. P. 1628–1631.
28. *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., and Vadi-mova O.L.* Laser amplification in Yb:YAG thin rods of different geometries: Simulation and experiment // JOSA B. 2018. V. 35. № 10. P. 2594–2599.