

Дизайн стартовой части субэкзаваттного лазера проекта XCELS

И.Б.Мухин, А.А.Соловьев, Е.А.Перевезенцев, А.А.Шайкин, В.Н.Гинзбург, И.В.Кузьмин, М.А.Мартьянов, И.А.Шайкин, А.А.Кузьмин, С.Ю.Мионов, И.В.Яковлев, Е.А.Хазанов

Представлена концепция стартовой части проекта XCELS (eXawatt Center for Extreme Light Studies). Дизайн нацелен на достижение высокой стабильности параметров излучения и возможности управления ими в широких пределах. На выходе стартовой части будут реализованы оптически синхронизованные chirпированные импульсы сигнала (длина волны 910 нм, ширина полосы более 100 нм, длительность ~3 нс) и накачки (длина волны 1054 нм, полоса ~1 нм, длительность ~4 нс) параметрических усилителей XCELS. Chирпированные фемтосекундные импульсы с энергией свыше 100 мДж (длительность после компрессии не более 15 фс со стабилизацией фазы относительно огибающей) будут следовать с частотой до 100 Гц, что позволит реализовать активную стабилизацию энергии и минимизацию углового джиттера излучения на выходе XCELS. Применение пикосекундной накачки в параметрическом усилителе стартовой части обеспечит высокий контраст фемтосекундных импульсов. Импульс накачки будет обладать линейной частотной модуляцией, что не скажется на эффективности параметрического усиления, но позволит с использованием спектральных методов управлять его формой с целью получения заданной формы импульса на выходе силовых усилителей даже в режиме их сильного насыщения.

Ключевые слова: фемтосекундные лазеры, сверхмощные лазеры, XCELS, параметрическое усиление, оптическая синхронизация, управление профилем импульса.

1. Введение

Достижение пиковых лазерных интенсивностей, превышающих 10^{24} Вт/см², открывает уникальную возможность исследования таких новых фундаментальных процессов, как поляризация вакуума, рождение элементарных частиц и т.д. Именно с этим связана высокая активность научного сообщества по разработке все более мощных лазеров, открывающая дорогу к новому направлению экспериментальной физики. На сегодняшний день с помощью различных подходов освоен уровень пиковой мощности в несколько ПВт – получена мощность 4.8 ПВт на основе ОРСПА (оптическое параметрическое усиление chirпированных импульсов) [1]. С использованием СПА (усиление chirпированных импульсов) в кристаллах Ti:сапфира достигнута пиковая мощность 10 ПВт [2]. При СПА в лазерных средах, легированных неодимом или иттербием, также достигнут петаваттный уровень мощности [3, 4]. Рассматриваются и другие пути повышения пиковой мощности петаваттных лазеров, основанные на нелинейном взаимодействии излучения со средой [5, 6].

При масштабировании пиковой мощности до уровня 100 ПВт на сегодняшний день во всех проектах рассматривается именно ОРСПА в широкоапертурных кристаллах DKDP, что обусловлено их большой апертурой и уникальным сверхширокополосным синхронизмом на

длине волны 910 нм [7]. Так, в лаборатории лазерной энергетики Рочестера (LLE) предлагается использовать каналы установки OMEGA для накачки ультраинтенсивной параметрической системы EP-OPAL [8]. Планируется достижение мощности 30 ПВт в двух каналах, что после двойной фокусировки позволит получать интенсивности более 10^{23} Вт/см². В институте лазерной инженерии (ILE) университета Осаки предложен проект GEKKO-EHA [9], цель которого – достичь мощности 50 ПВт при использовании в качестве накачки излучения одного из каналов установки LFEX. В Шанхайском институте оптики и прецизионной механики (SIOM) создается лазер SEL с пиковой мощностью излучения до 100 ПВт на основе когерентного сложения четырех каналов с мощностью излучения в каждом 30 ПВт [10]. В другом выполняемом проекте этого института, SG-II [11], планируется сложение шести параметрических каналов с суммарной пиковой мощностью 250 ПВт, что после фокусировки обеспечит интенсивность 10^{25} Вт/см².

Одним из таких проектов является XCELS [12], также основанный на сверхширокополосном параметрическом усилении в кристалле DKDP излучения на длине волны 910 нм и на многоканальной архитектуре с технологией когерентного сложения импульсов. Важной особенностью проекта XCELS является предложение дипольной геометрии фокусировки [13], максимизирующей амплитуду электрического поля в фокусе. В установке предполагается когерентное сложение 12 фемтосекундных каналов мощностью ~15 ПВт каждый, что позволит достичь интенсивности излучения 10^{25} Вт/см² в области взаимодействия. Использование когерентного сложения обуславливает исключительные требования к стабильности всех параметров системы, которая должна быть обеспечена на всех этапах, начиная с генерации и предварительного усиления затравочного импульса в стартовой

И.Б.Мухин, А.А.Соловьев, Е.А.Перевезенцев, А.А.Шайкин, В.Н.Гинзбург, И.В.Кузьмин, М.А.Мартьянов, И.А.Шайкин, А.А.Кузьмин, С.Ю.Мионов, И.В.Яковлев, Е.А.Хазанов. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: mib_1982@mail.ru

Поступила в редакцию 17 апреля 2021 г., после доработки – 11 августа 2021 г.

части и заканчивая компрессией и фокусировкой в мишенной камере.

В настоящей работе представлен концептуальный дизайн стартовой части лазерной установки класса «мега сайенс» XCELS. Сформулированы основные требования к выходным параметрам стартовой части и предложены решения для их реализации, основанные на имеющемся экспериментальном опыте.

2. Требования к стартовой части XCELS

Функциональная схема лазерного комплекса XCELS представлена на рис.1. Стартовая часть (очерчена штриховыми линиями) должна обеспечивать синхронную генерацию импульса инжекции в усилители на неодимовом стекле (накачка, $\lambda = 1054$ нм [14]), а также широкополосного сигнального импульса инжекции в ОРСПА-усилители на основе кристалла DKDP (сигнал, $\lambda = 910$ нм). После предварительного усиления (усилители DKDP-s и DKDP-0) сигнальный пучок делится на 12 каналов, каждый из которых состоит из оконечного усилителя (DKDP-1–12) и компрессора (K-1–12). Усилителем для накачки DKDP-s может служить как усилитель, разработанный в ИПФ РАН [15], так и коммерческий усилитель [16]. Высокоэнергетические усилители на неодимовом стекле для накачки DKDP-0–12 будут аналогичны усилителям проекта УФЛ-2М [17]. Платой за использование сверхширокополосного параметрического усиления (с условием дальнейшего когерентного сложения каналов) являются исключительные требования к джиттеру сигнала относительно накачки, которые можно удовлетворить только на основе оптической синхронизации. Требование к длительности импульса накачки обусловлено длительностью chirпированного сигнального импульса, которая, в свою очередь, определяется системой стретчер–ком-

прессор. В XCELS длительности импульсов накачки и сигнала составляют примерно 4 и 3 нс соответственно.

Фемтосекундные импульсы сигнального излучения после выхода из стартовой системы должны иметь достаточную энергию и следовать с достаточно высокой частотой, чтобы обеспечить как дальнейшее эффективное параметрическое усиление, так и возможность активной стабилизации энергии и волнового фронта излучения в последующих 12 каналах усиления и в мишенной камере. Кроме того, оптический контраст фемтосекундного импульса должен с запасом удовлетворять требованиям к контрасту выходного импульса всего лазера ($\sim 10^{12}$). Параметры импульса инжекции в высокоэнергетические лазеры накачки должны быть варьироваемыми в широких пределах для возможности оптимизации режимов усиления и управления временным профилем лазерного импульса. Стабильность основных параметров системы планируется поддерживать на высоком уровне для обеспечения хорошей повторяемости параметров импульсов на выходе высокоэнергетических каскадов усиления. Это будет достигаться за счет широкого применения коммерчески доступных волоконных и твердотельных усилителей лучших производителей, а также помещения в отдельные корпуса, термостабилизации и активной стабилизации вновь разрабатываемых оптических узлов. Ожидаемые выходные параметры стартовой части сведены в табл.1.

В стартовой части будет также несколько вспомогательных выходов излучения, которые могут использоваться в сопутствующих экспериментальных установках проекта XCELS. Так, пикосекундный импульс на $\lambda = 1030$ нм может применяться для создания лазера, облучающего фотокатод ускорителя электронов [18] при исследовании взаимодействия мощного лазерного излучения с электронными пучками. Импульс длительностью в несколько осцилляций поля со стабилизированной фазой

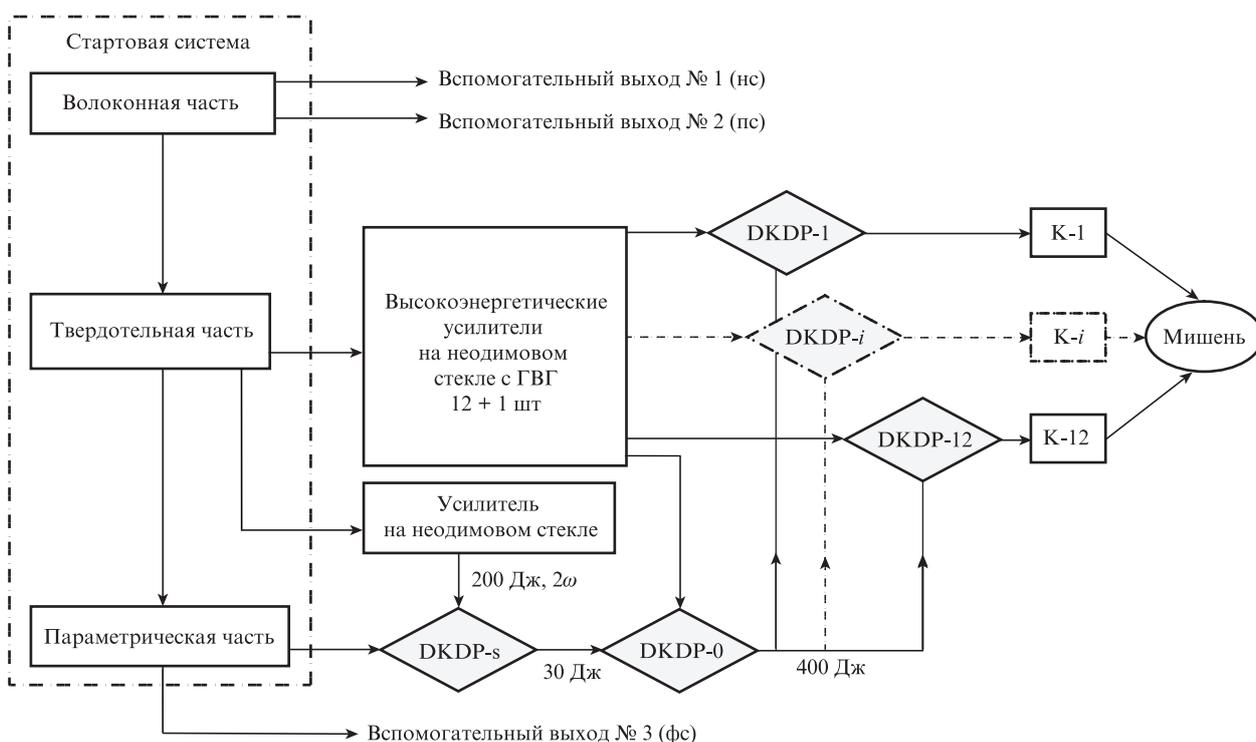


Рис.1. Функциональная схема лазера XCELS.

Табл.1. Основные параметры стартовой части XCELS.

Выходы	Длина волны (нм)	Ширина полосы (FWHM) (нм)	Энергия (мДж)	Длительность	Частота следования импульсов	Точность синхронизации по внешним часам (пс)	Стабильность энергии на выходе (СКО) (%)
Фемтосекундный канал	910	~100	>100	~3 нс*	>10 Гц	<1	0.5
Канал накачки промежуточного ОРСРА (DKDP-1)	1054	0.05–3	>100	~4 нс	>2 Гц	<10	0.5
Два канала накачки силовых ОРСРА (DKDP-0–12)	1054	0.05–3	>100	~4 нс	>2 Гц	<10	0.5
Вспомогательный канал № 1 (наносекундный)	1054	~1	~0.001	~1 нс	100 кГц	<1	0.3
Вспомогательный канал № 2 (пикосекундный)	1030	~1	~0.001	1 пс	50 МГц	<1	0.3
Вспомогательный канал № 3 (фемтосекундный)	910	>200	1	15 фс	1 кГц	<1	1

*Длительность после компрессора – менее 15 фс; контраст лучше 10¹⁴.

поля относительно огибающей может быть использован в исследованиях в области аттосекундной физики [19]. Наносекундный импульс на $\lambda = 1054$ нм после усиления может применяться для экспериментов, требующих одновременно и нано- и фемтосекундных импульсов (см., напр., [5]). Для всех этих исследований необходима оптическая синхронизация сигналов со всеми приборами лазерного комплекса XCELS.

3. Дизайн стартовой лазерной системы

Для достижения указанных в табл.1 параметров следует использовать самые современные и перспективные методы. Так, жесткие требования к временному джиттеру ведут к необходимости оптической синхронизации выходных каналов стартовой системы. Требования к временной стабильности выходных каналов могут быть выполнены с применением диодной накачки твердотельных усилителей. Диодная накачка обеспечит также большую частоту следования выходных импульсов твердотельных усилителей, которая важна для осуществления предварительной диагностики и юстировки основной части XCELS. Для получения широкополосного фемтосекундного сигнала необходимо применять различные методы нелинейного уширения спектра и стабилизацию фазы поля относительно огибающей. Временное профилирование лазерных импульсов с субнаносекундным разрешением требуется для компенсации искажения формы импульса в силовых усилителях на неодимовом стекле в основной части XCELS. В данном разделе описаны принципиальные подходы и конкретные решения, положенные в основу разработки стартовой части.

Стартовую часть (рис.2) можно условно разделить на волоконную, твердотельную и параметрическую части. Волоконная часть лазерной системы обеспечивает синхронизацию оптических импульсов относительно внешнего сигнала стандарта частоты, а также формирует задающие импульсы на основных длинах волн, используемых в лазере XCELS. В твердотельной части формируются оптимальные временной и пространственный профили лазерных импульсов накачки, которые усиливаются до соответствующих энергий. В параметрической части осуществляется параметрическая генерация фемтосекундных импульсов и их усиление с обеспечением высокого контраста.

3.1. Волоконная часть

Функциональный дизайн волоконной части представлен на рис.2,а. Задающим генератором (ЗГ) является фемтосекундный иттербиевый (Yb:YAG) волоконный лазер с частотой следования импульсов несколько десятков МГц, синхронизованный с внешним стандартом частоты. Это позволит синхронизировать с выходными импульсами лазера XCELS все приборы, необходимые для экспериментов. Излучение ЗГ делится на две реплики. Первая растягивается в волоконном стретчере (BC) на основе волоконной брэгговской решетки до ~1 нс и усиливается в волоконном усилителе ВУ1 на $\lambda \sim 1030$ нм до энергии в десятки нДж. Далее импульс делится на три реплики, в каждой из которых установлены электрооптический фильтр (ЭОФ) для снижения частоты следования импульсов и линия задержки (ЛЗ) на основе пьезоэлектрической шайбы [20] для тонкой юстировки временной задержки. Две реплики будут использованы в иттербиевых усилителях твердотельной части (рис.2,б), а третья – как вспомогательный выход № 2.

Вторая реплика излучения ЗГ будет скомпрессирована до спектрально ограниченной длительности и направлена в нелинейное волокно (НВ), которое уширит спектр так, чтобы он перекрывал полосу усиления неодимового стекла. Как правило, длительность импульса волоконных фемтосекундных генераторов составляет ~100 фс и менее. Это позволит сохранить высокую когерентность излучения после нелинейного взаимодействия с волокном. Далее импульс делится на четыре реплики, каждая из которых будет усилена до десятков нДж в волоконных регенеративных усилителях ВРУ1–4. Перед каждым ВРУ будут установлены ЛЗ для подстройки задержек импульсов в пикосекундном диапазоне длительностей, а также акустооптические спектральные фильтры (АОФ) [21] для перестройки ширины спектра пропускаемого излучения от нескольких нанометров до их долей с профилем огибающей, близким к гауссову.

В качестве одного из зеркал резонатора ВРУ используется chirpiрующая волоконная брэгговская решетка (ЧВБР). Ввод и вывод излучения осуществляется ЭОФ и изолятором Фарадея (ИФ). Многократное отражение от ЧВБР с дисперсией ~100 пс/нм и шириной спектра отражения более 5 нм позволит обеспечить необходимое стретчирование даже для узкополосных сигналов с шири-

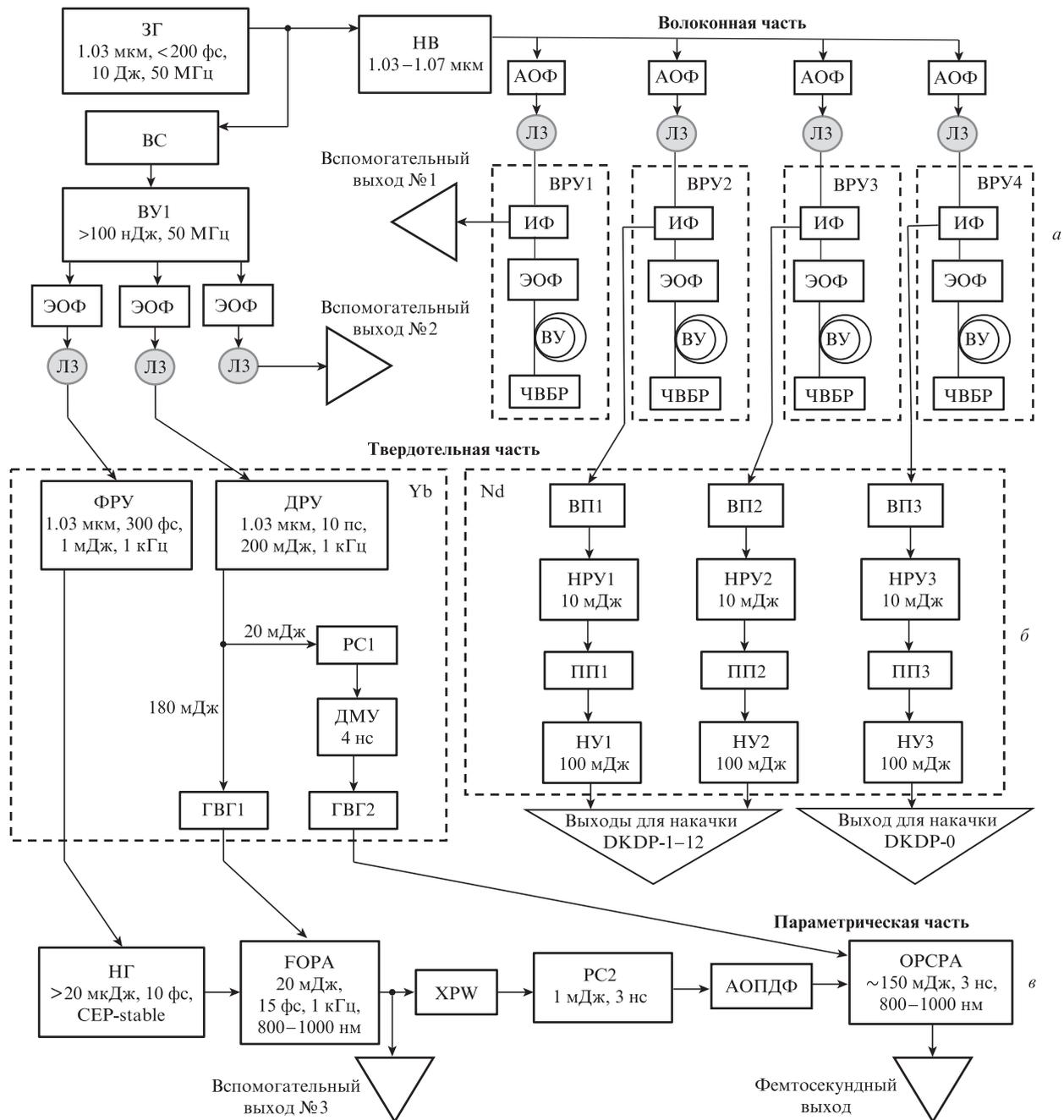


Рис.2. Функциональная схема волоконной (а), твердотельной (б) и параметрической (в) частей стартовой лазерной системы: ЗГ – задающий генератор; НВ – нелинейное волокно для уширения спектра; ВУ – волоконный усилитель; АОФ – акустооптический фильтр; ЭОФ – электрооптический фильтр; ЛЗ – линия задержки на основе «пьезоэлектрической шайбы»; ИФ – изолятор Фарадея; ЧВБР – циркулирующая волоконная брэгговская решетка; ВРУ1–4 – волоконные регенеративные усилители; ФРУ – фемтосекундный регенеративный усилитель; ДРУ – дисковый регенеративный усилитель; ДМУ – дисковый многопроходный усилитель; ВП1–3 – узлы временного профилирования импульса; ПП1–3 – узлы поперечного профилирования лазерного пучка; НРУ1–3 – неодимовые регенеративные усилители; НУ1–3 – неодимовые стержневые усилители; НГ – узел нелинейной параметрической генерации широкополосного фемтосекундного излучения; ГВГ1,2 – узлы генерации второй гармоники; FORA – узел параметрического усиления фемтосекундного сигнала в спектральном домене; ХРВ – узел генерации нелинейной ортогональной поляризации излучения; ОРСРА – узел параметрического усиления циркулированных импульсов; ВС – волоконный стретчер; РС1,2 – стретчеры на дифракционных решетках; АОПДФ – акустооптический программируемый дисперсионный фильтр.

ной спектра менее 0.1 нм, а также относительно плавно управлять длительностью импульсов с шириной спектра ~ 1 нм благодаря варьированию числа обходов ВРУ. Одновременная подстройка мощности накачки обеспечивает сохранение энергии в импульсе порядка 100 нДж при любом числе обходов. Характерные ожидаемые спектр и

профиль импульса для каналов параметрической накачки, реализованные в коммерчески доступной лазерной системе производства «Авеста», представлены на рис.3. Воспроизводимость результатов измерения очень высока (лучше 0.3% СКО), а небольшая модуляция распределений во многом зависит от реализации ввода излучения в

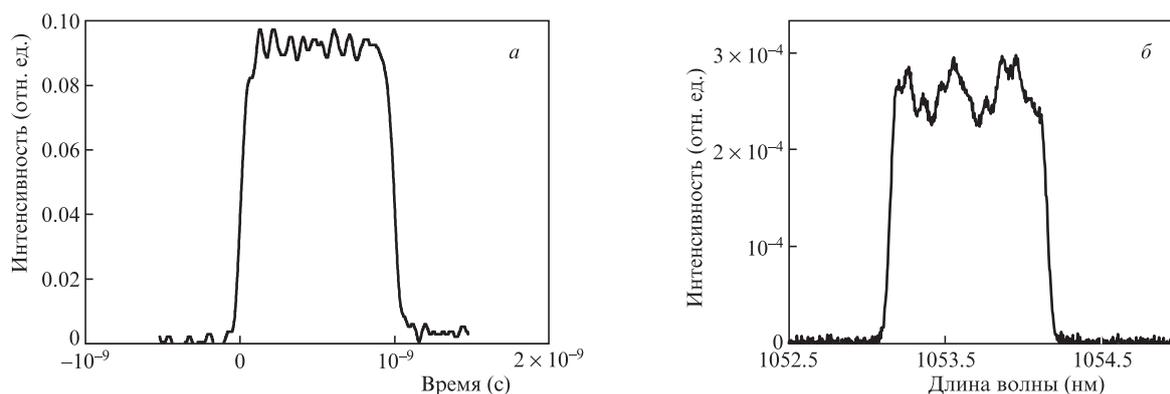


Рис.3. Форма (а) и спектр (б) импульса прототипа волоконной лазерной системы. Спектр измерен методом сканирования. Длительность импульса в XCELS составит 5 нс.

волокно измерительных устройств. Предлагаемая концепция волоконной части стартовой системы позволит аппаратно регулировать длительность и ширину спектра в значительном диапазоне без вмешательства в конструкцию. Выходной импульс ВРУ1 будет использован как вспомогательный канал, а три других – для инъекции в Nd-усилители (усилители на неодимовом стекле) твердотельной части.

Следует отметить, что предлагаемый дизайн волоконной части основан на стандартных решениях и комплектующих и может быть реализован на основе коммерческих продуктов ведущих производителей лазерной техники.

Одной из важных задач стартовой части является организация достаточно высокой степени синхронизации между фемтосекундным сигналом и сигналом накачки при дальнейшем параметрическом усилении импульсов. Один из таких известных подходов – оптическая синхронизация, при которой исходное излучение синхронизируемых сигналов генерируется в едином фемтосекундном оптическом генераторе. Как мы покажем ниже, генерация фемтосекундного сигнала будет осуществляться посредством нелинейного преобразования сигнала после одного из иттербиевых твердотельных усилителей (Yb-усилители на кристалле Yb:YAG), а сигнал накачки будет подготовлен в Nd-усилителях. Оптический сигнал для обоих типов усилителей генерируется в едином фемтосекундном волоконном генераторе. Большая частота следования импульсов всех выходных сигналов волоконной части позволит выбирать для усиления различные по времени импульсы для минимизации временной задержки между импульсами излучения различных каналов. При этом все эти импульсы оптически синхронизованы между собой, поскольку по своей природе являются репликами одного и того же импульса фемтосекундного генератора с временной задержкой относительно друг друга, соответствующей длине резонатора фемтосекундного источника. Синхронизация с другими устройствами может быть обеспечена использованием оптического сигнала вспомогательных выходов излучения либо синхронизацией волоконного фемтосекундного источника излучения с внешним стандартом частоты.

3.2. Твердотельная часть

Импульсы с выхода волоконной части усиливаются в твердотельной части (рис.2,б): два – в Yb-усилителях и три – в Nd-усилителях. Фемтосекундный регенеративный

Yb-усилитель ФРУ [22, 23] усиливает импульс до миллиджоульного уровня энергии с сохранением минимальной (субпикосекундной) длительности. Этот импульс используется в параметрической части для генерации сигнального излучения в области 910 нм. Импульс со второго выхода волоконной части будет усилен в дисковом регенеративном Yb-усилителе ДРУ, аналогичном [24], до энергии 200 мДж с частотой следования ~ 1 кГц и скомпрессирован до ~ 10 пс. Основная часть энергии (180 мДж) импульса после удвоения в ГВГ1 будет использована в качестве пикосекундной накачки FOPA (Frequency domain Optical Parametric Amplification) в параметрической части, см.рис.2,в. Оставшаяся часть (20 мДж) импульса будет растянута до 5 нс в решеточном стретчере РС1 и усилена в ДМУ до субджоульной энергии (частота следования ~ 100 Гц). Этот импульс после удвоения в ГВГ2 будет использован в качестве наносекундной накачки ОРСРА в параметрической части. Временной профиль усиливаемых лазерных импульсов в Yb-усилителях будет близок к гауссову. Пространственный профиль лазерного пучка после ДМУ будет преобразован в супергауссов [25].

Одним из сложных в реализации требований для стартовой системы является обеспечение высокой частоты повторения сигнала с относительно высокой энергией в импульсе. В существующих коммерчески доступных фемтосекундных системах мультитераваттного уровня пиковой мощности для увеличения частоты следования импульсов используются кристаллы Nd:YAG [26]. Однако ширина спектра излучения этого материала слишком мала для усиления chirпированных импульсов, а электрическая синхронизация импульса лазера накачки с фемтосекундным импульсом не позволит удовлетворить требованиям к синхронизации. Поэтому был выбран Yb:YAG, ширина спектра усиления которого превышает 1 нм. Для обеспечения высокой частоты следования импульсов планируется использовать активный элемент дисковой геометрии. Согласно выполненным расчетам, использование дискового активного элемента при энергии накачки 4 Дж обеспечит до 1 Дж запасенной энергии и коэффициент усиления 1.5, а при использовании активного элемента композитной структуры [27] – до 1.5 Дж и 2 соответственно. В многопроходной схеме усиления, исследованной, например, в [28], субджоульная энергия импульса может быть достигнута при энергии импульсов на входе в усилитель несколько десятков миллиджоулей.

Импульсы с трех «неодимовых» выходов стартовой части с длиной волны в области усиления неодимового

фосфатного стекла (1054 нм) и регулируемой шириной спектра будут направлены в системы временного профилирования импульсов ВП1–3, действие которых основано на спектральных подходах. Важным преимуществом использования chirпированных импульсов накачки (спектронов) является возможность управления их временным профилем в результате модифицирования их спектров, как в работах [29, 30]. Профилирование предполагается реализовать в схеме на основе системы стретчер–компрессор с нулевой частотной дисперсией, в фурье-плоскости которого размещен пространственный модулятор света SLM (Spatial Light Modulator). Эта схема была испытана экспериментально. Источником излучения служил малоэнергетичный непрерывный диодный лазер с центральной длиной волны 1054 нм и шириной спектра несколько нанометров. На SLM подается изображение в виде 256 градаций серого, которые линейно связаны с фазовым сдвигом, генерируемым SLM. При равномерном изменении градаций серого изменяется общее пропускание системы, а при формировании определенной картинки (например, «окна» с отличающимися градациями) реализуются спектральная и временная модуляции импульса. Минимальное пропускание системы 1.2% определяет максимально возможную глубину модуляции импульса при прохождении системы профилирования (рис.4,а). Область значений вблизи минимальной ширины окна пропускания (при условии пропускания не менее 50%) демонстрирует спектральное разрешение системы профилирования около 0.12 нм (рис.4,б). Увеличение плотности штрихов дифракционной решетки и/или диаметра пучка в системе профилирования позволит дополнительно улучшить спектральное разрешение.

На рис.5 представлен результат численного моделирования работы системы профилирования и усилителя. В качестве исходного был использован chirпированный гауссов импульс (центральная длина волны 1054 нм, ширина спектра на полувысоте 1 нм) длительностью 3 нс. Далее проводилось моделирование работы шейпера с учетом указанного разрешения 120 пм/пиксель. Спектральная маска подбиралась таким образом, чтобы сформированный на выходе из шейпера лазерный импульс

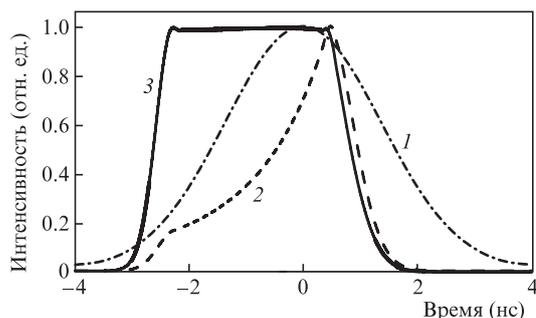


Рис.5. Профили импульсов, полученные при численном моделировании работы системы профилирования и усилителя (1 – исходный импульс, 2 – профилированный импульс, 3 – импульс на выходе усилителя).

обеспечивал квазипрямоугольное временное распределение интенсивности с длительностью 4 нс на выходе усилителя. При моделировании работы усилителей использовалась оптическая схема накачки лазерного комплекса PEARL [15]. Кривая 3 на рис.5 – лазерный импульс с энергией 300 Дж на выходе усилителя.

После ВП все три импульса усиливаются до энергии ~ 10 мДж в регенеративных Nd-усилителях НРУ, которые работают в слабонасыщенном режиме, чтобы минимизировать изменения формы импульса. Регенеративные усилители также уменьшают частоту следования импульсов до 10 Гц с оптимальной временной задержкой относительно фемтосекундного сигнала. Затем пучок профилируется до оптимального поперечного профиля узлом ПП и усиливается до энергии более 100 мДж в двухкаскадном стержневом Nd-усилителе НУ1–3. Диодная накачка в этих усилителях позволит работать при частоте следования импульсов 10 Гц. Далее импульсы инжектируются в силовые усилители на неодимовом стекле.

3.3. Параметрическая часть

Для накачки параметрических каскадов усиления как в стартовой части, так и во всем лазере XCELS будут ис-

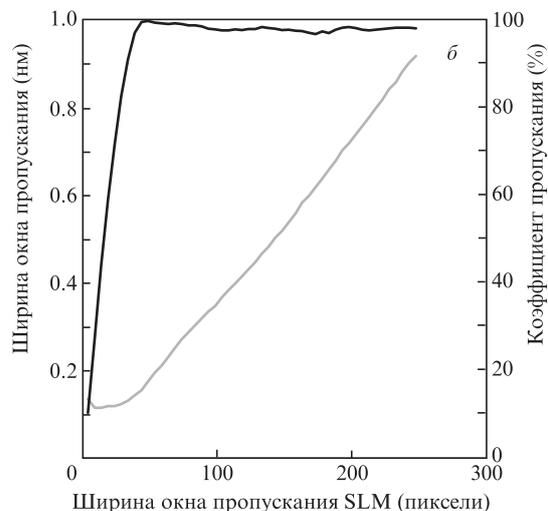
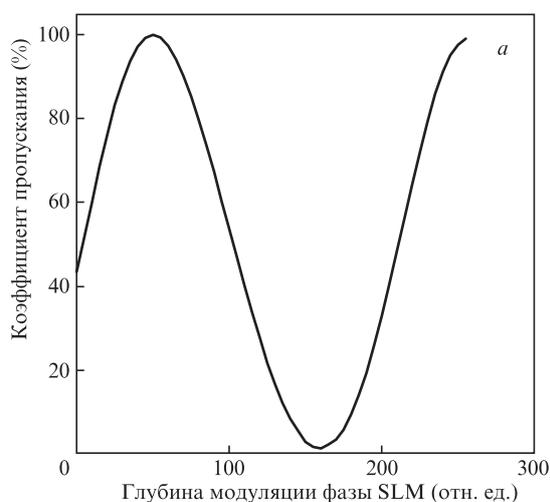


Рис.4. Зависимость коэффициента пропускания системы профилирования в рабочем диапазоне длин волн шириной 1 нм от глубины модуляции фазы SLM (а) и зависимости спектральной ширины окна пропускания (серая кривая) и относительной величины пропускания сигнала (черная кривая) от ширины окна модулируемого на SLM окна пропускания системы профилирования (б).

пользоваться chirпированные импульсы длительностью ~ 4 нс. Однако наличие chirпа может повлиять на полосу параметрического усиления в нелинейном кристалле. Проведено численное моделирование влияния ширины спектра импульса накачки на спектральную зависимость параметрического усиления. Расчеты проводились для плоских волн без учета дифракции. Дифракционный угол для пучков большого диаметра значительно меньше экспериментальной точности определения углов синхронизма, которая составляет 0.02° [7], а расходимость как сигнального пучка, так и пучка накачки близка к дифракционной. Следовательно, дифракционные эффекты не могут качественно повлиять на полосу усиления. На рис.6 представлены спектральные зависимости коэффициента усиления в кристалле DKDP длиной 68 мм со степенью дегерирования 96% при монохроматической накачке с длиной волны 527 нм [7], а также при chirпированной по частоте накачке (1 нм/1 нс) со знаком chirпа, как совпадающим со знаком chirпа сигнала, так и с противоположным ему. Во всех случаях интенсивность излучения на-

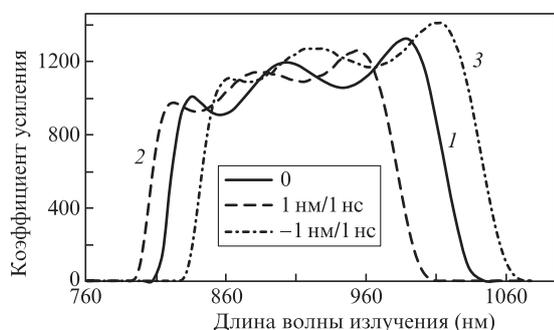


Рис.6. Спектральные зависимости коэффициента усиления в кристалле DKDP: 1 – при монохроматической накачке на $\lambda = 527$ нм (отклонение угла в критической плоскости между волновым вектором излучения накачки и оптической осью кристалла от угла точного синхронизма $\Delta\theta_3 = -0.045^\circ$, отклонение угла в не критической плоскости между волновыми векторами накачки и сигнала от угла точного синхронизма $\Delta\varphi_{13} = -0.052^\circ$); 2 – при chirпированной по частоте накачке 1 нм/1 нс со знаком chirпа, совпадающим с сигнальным chirпом ($\Delta\theta_3 = -0.133^\circ$, $\Delta\varphi_{13} = -0.167^\circ$); 3 – при chirпированной по частоте накачке 1 нм/1 нс со знаком chirпа, противоположным сигнальному chirпу ($\Delta\theta_3 = 0.076^\circ$, $\Delta\varphi_{13} = 0.083^\circ$). Углы точного синхронизма $\theta_3 = 37.03^\circ$, $\varphi_{13} = 0.91^\circ$ [7].

качки равнялась 1 ГВт/см², а углы взаимодействия немного варьировались вблизи углов синхронизма на центральных длинах волн накачки и сигнала для оптимизации полосы усиления. Из рис.6 видно, что подбор углов взаимодействия позволяет обеспечить усиление сигнала в необходимой полосе до 200 нм, независимо от знака chirпа накачки. Таким образом, использование chirпированных импульсов накачки может немного сдвинуть или увеличить ширину полосы усиления, что повлияет на эффективность параметрического усиления незначительно.

Источником излучения для сигнальной волны параметрической части стартовой системы будет сигнал миллиджоульного уровня энергии с выхода иттербиевого ФРУ. Аналогично работам [31, 32], с помощью генерации суперконтинуума и параметрических усилителей данное излучение будет преобразовано в диапазон длин волн 700–1000 нм со спектрально ограниченной длительностью в несколько осцилляций поля и пассивной стабилизацией фазы осцилляций поля относительно огибающей, что может быть важно для организации когерентного сложения 12 импульсов лазера XCELS в точке взаимодействия. Экспериментально исследована возможность широкополосной генерации фемтосекундного излучения в такой системе [32]. Спектр выходного излучения лазерной системы, описанной в работе [32], находится в области 2 мкм. Данная система была несколько модернизирована: центральная длина волны излучения была перестроена в область 1.8 мкм путем юстировки ориентации нелинейных кристаллов, на выходе установлен достаточно тонкий кристалл ВВО для генерации второй гармоники, далее этот сигнал дополнительно параметрически усилен до 10 мкДж и сжат до спектрально ограниченной длительности chirпирующими зеркалами. Первые эксперименты показали возможность генерации лазерных импульсов длительностью ~ 20 фс (рис.7) в полосе параметрического усиления в кристалле DKDP. Экспериментальная демонстрация компрессии сигнала до длительности, близкой к спектрально ограниченной (~ 20 фс), демонстрирует пригодность такого сигнала для усиления методом ОРСПА. Наличие двух горбов в спектре связано с довольно сложной схемой генерации фемтосекундного сигнала с несколькими нелинейными преобразованиями. Путем юстировки кристаллов и длины линий задержки

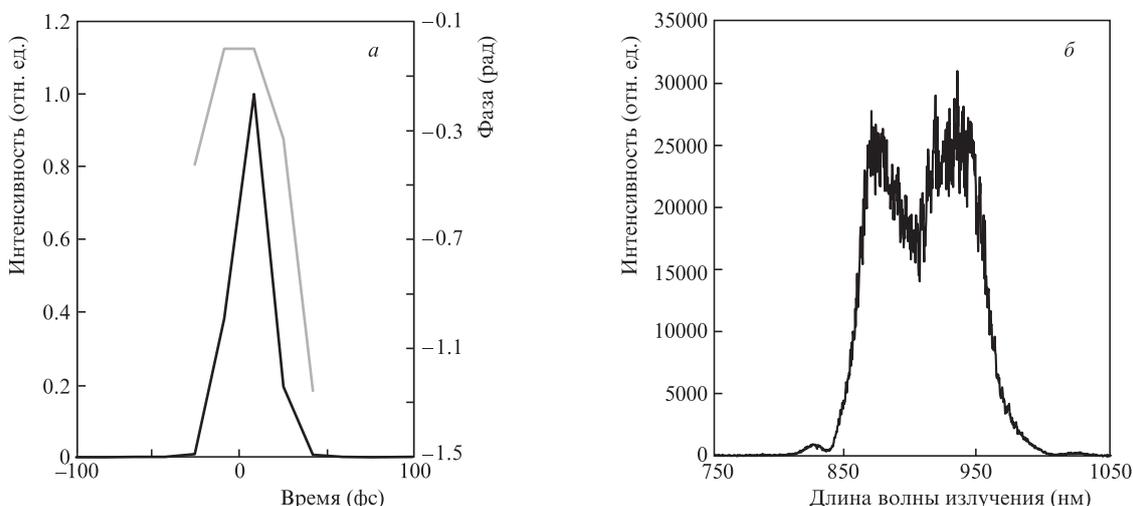


Рис.7. Форма и фаза (серая кривая) импульса, измеренные методом FROG (а), и спектр фемтосекундного излучения нелинейной параметрической системы [32], настроенной на центральную длину волны излучения 910 нм (б).

можно регулировать ширину генерируемого спектра и глубину провала в его центре. При дальнейшем усилении chirпированного фемтосекундного сигнала наличие провала может частично компенсировать неравномерное по спектру параметрическое усиление, если будет использоваться импульс накачки с гауссовым (или колоколообразным) временным профилем. Это позволит уменьшить обужение сигнала в процессе дальнейшего параметрического усиления.

Далее импульс будет параметрически усилен в кристалле ВВО, вырезанном под синхронизм I типа, с применением подхода параметрического усиления в спектральном домене (FOPA) [33]. Накачка будет осуществляться второй гармоникой излучения с выхода дискового регенеративного усилителя ДРУ1 (см. рис.2). Такой подход позволит избавиться от дополнительных узлов стретчирования и компрессии на данной стадии усиления сигнала. При оптической эффективности FOPA 10% энергия усиленного импульса составит ~18 мДж. Отметим, что оптическая синхронизация обеспечит субпикосекундный временной джиттер между сигналом и накачкой даже без дополнительной стабилизации импульсов [34], а меры, принятые для временной стабилизации, позволят уменьшить джиттер вплоть до десятков фемтосекунд [35]. Для обеспечения стабильности усиления в FOPA длительность импульсов накачки должна быть на порядок больше (~10 пс). Согласно предварительным расчетам, подход FOPA можно масштабировать и оптимизировать для использования иттербиевого лазера в качестве источника накачки и сигнального импульса длительностью ~10 пс. Используя энергию накачки ~200 мДж, доступные на сегодняшний день кристаллы ВВО с апертурой ~30 мм и дифракционную решетку с плотностью 300 штрих./мм, можно эффективно усиливать излучение с шириной спектра ~300 нм.

Для повышения контраста фемтосекундных импульсов стартовой системы планируется реализовать метод генерации нелинейной поляризации (XPW [36]) на миллиджоульном уровне энергии сигнала. Также необходимо отметить, что использование пикосекундной накачки в предыдущих каскадах усиления позволит избежать ухудшения контраста фемтосекундных импульсов на наносекундном временном интервале.

Далее сигнальный импульс с оптимальным для последующего усиления спектром излучения будет растянут стретчером на основе дифракционных решеток (узел РС2 на рис.2). Очевидно, что для согласования по дисперсионным характеристикам стретчер и компрессор должны быть основаны на дифракционных решетках с одинаковой плотностью штрихов, а также иметь близкие углы падения излучения на решетки. Большой диаметр пучков в компрессоре (от 40 до 55 см) плюс достаточно широкий спектр сигнального излучения накладывают ограничения на минимальное расстояние между решетками компрессора, тем самым определяя минимальную длительность растянутого импульса. Растянуть импульс до 3 нс для пучка диаметром 1–2 см не составляет труда. Следует отметить, что для минимизации аберраций стретчер будет собран с использованием схемы Оффнера на двух дифракционных решетках. Затем данное излучение будет направлено в АОПДФ [37] для оптимизации спектральной фазы и достижения спектрально ограниченной длительности импульса после оконечного компрессора XCELS.

После АОПДФ импульс параметрически усиливается в кристалле DKDP (узел ОРCPA на рис.2) с использованием в качестве накачки второй гармоники излучения дискового усилителя ДМУ. При энергии импульса второй гармоники 500 мДж и эффективности параметрического усиления ~30% ожидается достижение энергии chirпированных фемтосекундных импульсов ~150 мДж с высокой (до 100 Гц) частотой их следования. Далее импульс направляется в силовые параметрические усилители основной части XCELS.

4. Заключение

В работе представлены результаты предварительных исследований и разработки концептуального дизайна лазерной системы для стартовой части субкВт лазерной системы проекта XCELS. Комбинация волоконной и твердотельной составляющих лазерной системы позволяет гибко управлять основными параметрами выходных каналов излучения и при необходимости добавлять дополнительные каналы. Использование подходов генерации суперконтинуума и пассивной стабилизации фазы поля относительно огибающей обеспечивает широкую перестройку параметров фемтосекундного сигнала. Применение пикосекундных каскадов параметрического усиления и генерации нелинейной поляризации обеспечивает высокий уровень контраста фемтосекундных импульсов миллиджоульного уровня энергии. Генерация излучения с относительно большой средней мощностью в каналах стартовой системы позволит обеспечить стабилизацию основных параметров оконечных каскадов лазерной системы XCELS. Основные составляющие стартовой системы являются либо коммерчески доступными, либо реализованы в рамках научных исследований. Некоторые из предлагаемых узлов и подходов разработаны или проверяются экспериментально авторским коллективом данной работы.

Работа поддержана НЦМУ «Центр фотоники» при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2020-906), а также Еврокомиссией (грант № 871072-CREMLINplus).

1. Zeng X., Zhou K., Zuo Y., Zhu Q., Su J., Wang X., Wang X., Huang X., Jiang X., Jiang D., Guo Y., Xie N., Zhou S., Wu Z., Mu J., Peng H., Jing F. *Opt. Lett.*, **42** (10), 2014 (2017).
2. Thales website: <https://www.thalesgroup.com/en/group/journalist/press-release/worlds-most-powerful-laser-developed-thales-and-elinp-achieves>.
3. Perry M.D., Pennington D., Stuart B.C., Tietbohl G., Britten J.A., Brown C., Herman S., Golick B., Kartz M., Miller J., Powell H.T., Vergino M., Yvanovsky V. *Opt. Lett.*, **24** (3), 160 (1999).
4. Albach D., Loeser M., Siebold M., Schramm U. *High Power Laser Sci. Eng.*, **7**, e1 (2019).
5. Ren J., Cheng W., Li S., Suckewer S. *Nature Phys.*, **3** (10), 732 (2007).
6. Хазанов Е.А., Миронов С.Ю., Мурр Ж. *УФН*, **189** (11), 1173 (2019) [*Usp. Phys.*, **62**, 1096 (2019)].
7. Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Khazanov E.A., Palashov O.V., Sergeev A.M., Yakovlev I.V. *Laser Phys.*, **15** (9), 1319 (2005).
8. Bromage J., Bahk S.-W., Begishev I.A., Dorrer C., Guardalben M.J., Hoffman B.N., Oliver J.B., Roides R.G., Schiesser E.M., Shoup M.J. III, Spilatro M., Webb B., Weiner D., Zuegel J. *High Power Laser Sc. Eng.*, **7**, e4 (2019).
9. Kawanaka J., Tsubakimoto K., Yoshida H., Fujioka K., Fujimoto Y., Tokita S., Jitsuno T., Miyanaga N., Team G.-E.D. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **688**, 012044 (2016).

10. Beijie Shao, Yanyan Li, Wenkai Li, Yujie Peng, Pengfei Wang, Junyu Qian, Yuxin Leng, Li R., in Techn. Dig. *The 22nd International Conference on Ultrafast Phenomena* (OSA, 2020, paper W2A.7).
11. Zhu J., Xie X., Sun M., Kang J., Yang Q., Guo A., Zhu H., Zhu P., Gao Q., Liang X., Cui Z., Yang S., Zhang C., Lin Z. *High Power Laser Sci. Eng.*, **6** (29), 1 (2018).
12. <https://xcels.iapras.ru/news.html>.
13. Gonoskov I., Aiello A., Heugel S., Leuchs G. *Phys. Rev. A*, **86**, 053836 (2012).
14. Tesar A., Campbell J., Weber M., Weinzapfel C., Lin Y., Meissner H., Toratani H. *Opt. Mater.*, **1** (3), 217 (1992).
15. Шайкин А.А., Кузьмин А.А., Шайкин И.А., Бурдонов К.Ф., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **46** (4), 371 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (4), 371 (2016)].
16. <https://amplitude-laser.com/products/nanosecond-lasers/nanosecond-advanced-lasers/premiumlite-glass/>.
17. <https://scientificrussia.ru/articles/samaya-moshchnaya-lazernaya-ustanovka-v-mire-stroitelstvo-ufl-2m-v-sarove>.
18. Миронов С.Ю., Андрианов А.В., Гачева Е.И., Зеленогорский В.В., Потемкин А.К., Хазанов Е.А., Бонпорнпрасерт П., Грос М., Гуд Д., Исаев И., Калантарян Д., Козак Т., Красильников М., Кьян Х., Ли К., Лишилин О., Мелкумян Д., Оппельт А., Ренье И., Рублак Т., Фельбер М., Хук Х., Чен Й., Штефан Ф. *УФН*, **187** (10), 1121 (2017) [*Usp. Phys.*, **60**, 1039 (2017)].
19. Corkum P.V., Krausz F. *Nature Phys.*, **3**, 381 (2007).
20. Зеленогорский В.В., Андрианов А.В., Гачева Е.И., Геликонов Г.В., Красильников М., Мартыянов М.А., Миронов С.Ю., Потёмкин А.К., Сыресин Е.М., Штефан Ф., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **44** (1), 76 (2014) [*Quantum Electron.*, **44** (1), 76 (2014)].
21. https://www.santec.com/en/products/instruments/tunablefilter/?gclid=Cj0KCQjwnueFBhChARI%20sAPu3YkRN6Y5y_DXvKYKy0THxNHQeGdXpCGeFE9u37RUtx0pZ6t6c5RC5CGsaAkR5EA%20Lw_wcB.
22. <http://avesta.ru/en/product/teta-industrial-femtosecond-laser-system/>.
23. <https://lightcon.com/product/pharos-femtosecond-lasers/>.
24. <https://www.trumpf-scientific-lasers.com/products/dira-series/>.
25. <http://www.pishaper.com/>.
26. Budriūnas R., Stanislauskas T., Adamonis J., Aleknavičius A., Veitas G., Gadonas D., Balickas S., Michailovas A., Varanavičius A. *Opt. Express*, **25** (5), 5797 (2017).
27. Vadimova O., Kuznetsov I., Mukhin I., Perevezentsev E., Palashov O. *Laser Phys.*, **25**, 095001 (2015).
28. Chen H., Song E., Dong J., Zhu X., Wang H., Zhu G., in Techn. Dig. *Conference on Lasers and Electro-Optics* (OSA 2020, paper JW2B.13).
29. Mironov S.Y., Poteomkin A.K., Gacheva E.I., Andrianov A.V., Zelenogorskii V.V., Krasilnikov M., Stephan F., Khazanov E.A. *Appl. Opt.*, **55** (7), 1630 (2016).
30. Kuzmin I., Mironov S., Gacheva E., Zelenogorsky V., Potemkin A., Khazanov E., Kanareykin A., Antipov S., Krasilnikov M., Loisch G. *Laser Phys. Lett.*, **16** (1), 015001 (2019).
31. Chen P.-Y., Farhat M., Askarpour A.N., Tymchenko M., Alù A. *Optics*, **16**, 094008 (2014).
32. Мухин И.Б., Волков М.Р., Викулов И.А., Перевезенцев Е.А. Палашов О.В. *Квантовая электроника*, **50** (4), 321 (2020) [*Quantum Electron.*, **50** (4), 321 (2020)].
33. Schmidt B.E., Thire N., Boivin M., Laramée A., Poitras F., Lebrun G., Ozaki T., Ibrahim H., Legare F.O. *Nature Commun.*, **5**, 3643 (2014).
34. Casanova A. et al. *Opt. Lett.*, **41** (5), 898 (2016).
35. Miura T., Takasago K., Kobayashi K., Zhang Z., Torizuka K., Kannari F. *Jpn J. Appl. Phys. Pt 1*, **40**, 1260 (2001).
36. Ramirez L.P., Papadopoulos D.N., Pellegrina A., Georges P., Druon F., Monot P., Ricci A., Jullien A., Chen X., Rousseau J.P., Lopez-Martens R. *Opt. Express*, **19** (1), 93 (2011).
37. Tournois P. *Opt. Commun.*, **140** (4–6), 245 (1997).