

PACS 42.60.By; 42.70.Hj; 42.65.Re; 542.65.Yj

# Мультитераваттная фемтосекундная лазерная система с килогерцевой частотой следования импульсов

В.В.Петров, Е.В.Пестряков, А.В.Лаптев, В.А.Петров, Г.В.Купцов,  
В.И.Трунов, С.А.Фролов

*Представлены основные принципы создания, схема и элементная база мультитераваттной фемтосекундной лазерной системы с килогерцевой частотой следования импульсов  $f$  на основе их параметрического усиления и лазерного усиления пикосекундного излучения накачки каскадов параметрического усилителя. Приведены результаты расчетов поэтапного увеличения выходной мощности канала параметрического усиления на кристаллах LBO до мультитераваттного уровня. На разработанной элементной базе в канале накачки лазерной системы экспериментально исследованы параметры регенеративного усилителя с выходной энергией  $\sim 1$  мДж на длине волны 1030 нм и  $c/f = 1$  кГц. Разработана оптическая схема многопроходного криогенного усилителя на лазерной керамике  $Yb:Y_2O_3$  с накачкой излучением диодных лазеров и определены ее характеристики для достижения выходной энергии в диапазоне 0.25–0.35 Дж.*

**Ключевые слова:** лазерные среды, лазерная диодная накачка, фемтосекундные импульсы, высокоинтенсивные лазерные системы, криогенные температуры.

## 1. Введение

В последнее время особое внимание уделяется разработке принципов и элементной базы высокоинтенсивных фемтосекундных лазерных систем мультитераваттной мощности с частотой следования импульсов килогерцевого уровня. Основная цель этих работ состоит в создании лазерных систем с интенсивностью, достигающей ультра-релятивистского предела ( $10^{25}$  Вт/см<sup>2</sup>), предназначенных для изучения физики экстремальных лазерных полей и проведения экспериментальных исследований по нелинейной квантовой электродинамике, а также для принципиально новых технологических применений, таких как лазерное ускорение заряженных частиц, лазерный термоядерный синтез и др. [1, 2].

Исследования показывают, что наиболее перспективно создание таких систем на основе параметрического усиления фемтосекундных импульсов методом ОРСПА (optical parametric chirped pulse amplification) [3] с использованием для накачки излучения твердотельных лазеров на активных средах, возбуждаемых излучением лазерных диодов. В связи с этим значительные усилия в таких проектах, как LUCIA [4], DiPOLE [5], HiLASE [6], направлены на создание элементной базы твердотельных лазерных систем с диодной накачкой для работы при энергии импульсов порядка 100 Дж и выше. Использование излу-

чения этих систем для накачки оптических параметрических усилителей (ПУ) позволит создавать фемтосекундные комплексы мультитераваттной и петаваттной пиковой мощности с высокой частотой следования импульсов [3].

Несмотря на активные исследования в ведущих лазерных центрах, работы по этой теме далеки от завершения. Задачей нашего проекта является разработка данного направления на элементной базе, основанной на больших размерных нелинейных кристаллах группы боратов (ВВО и LBO) в канале параметрического усиления и на кристаллических и керамических лазерно-активных элементах группы алюминиевых гранатов (YAG, LuAG) и полуторных оксидов ( $Y_2O_3$ ,  $Lu_2O_3$  и др.) в канале лазерного усиления излучения накачки ПУ.

В рамках проекта проведены следующие исследования.

1. Разработана принципиальная схема поэтапного развития фемтосекундной лазерной системы от тераваттного до мультитераваттного уровня пиковой мощности, основанная на использовании ОРСПА-канала из широкополосных ПУ фемтосекундных импульсов. Накачка ПУ осуществлялась излучением СПА-канала (chirped pulse amplification) лазерных усилителей на активированных ионами Yb оптических кристаллических и керамических элементах с диодной накачкой, работающих при комнатных и криогенных температурах.

2. Проведено численное моделирование ОРСПА-канала параметрического усиления импульса стартового фемтосекундного излучения с шириной спектра 300 нм на центральной длине волны 1030 нм до пиковой мощности 100 ТВт и определены конфигурации схем и оптимальные размеры нелинейных кристаллов ВВО и LBO.

3. Разработаны и исследованы стретчеры импульсов стартового генератора фемтосекундных импульсов в ОРСПА- и СПА-каналах усиления.

4. Экспериментально исследован криогенный режим работы регенеративного усилителя на кристалле Yb:KYW в СПА-канале.

5. Проведено численное моделирование многопроходного усилителя в СПА-канале лазерного усиления на эле-

**В.В.Петров, В.А.Петров, Г.В.Купцов.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073 Новосибирск, просп. К.Маркса, 20; e-mail: vpstv@laser.nsc.ru

**Е.В.Пестряков.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: pefvic@laser.nsc.ru

**А.В.Лаптев, В.И.Трунов, С.А.Фролов.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3

Поступила в редакцию 3 марта 2014 г., после доработки – 11 марта 2014 г.

ментах из кристаллов Yb:YAG, Yb:LuAG и керамик Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## 2. Структура мультитераваттной фемтосекундной лазерной системы

Основной принцип построения системы заключается в использовании широкополосного параметрического ОРСПА-усиления импульсов стартового фемтосекундного лазера, накачка которого осуществляется излучением второй гармоники части излучения стартового лазера, СПА-усиленного в каскадах с диодной накачкой на активированной ионами Yb<sup>3+</sup> лазерных кристаллических и керамических элементах. Излучение стартового фемтосекундного генератора с центральной длиной волны 1030 нм разделяется и усиливается в двух каналах: СПА-канале накачки, формирующем пикосекундное излучение для накачки ПУ, и ОРСПА-канале параметрического усиления, что упрощает осуществление оптической синхронизации каналов.

В СПА-канал накачки входят стретчер, регенеративный усилитель, многопроходный усилитель, компрессор и блок удвоения частоты излучения (ГВГ) на основе нелинейно-оптического кристалла из группы боратов.

ОРСПА-канал усиления состоит из отрезка фотонно-кристаллического волокна (ФКВ), предназначенного для обогащения спектра излучения стартового фемтосекундного Yb-лазера и формирования после усиления на выходе системы импульсов длительностью 10–11 фс, отрицательного стретчера, последовательности каскадов ПУ на основе нелинейно-оптических кристаллов группы боратов и компрессоров на базе чирпованных зеркал и оптических материалов с положительной дисперсией. Все это позволяет осуществлять поэтапное развитие системы от тераваттной до мультитераваттной и даже петаваттной пиковой мощности.

Следует также отметить, что использование новых лазерных материалов, активированных ионами Yb<sup>3+</sup>, дает возможность получать в канале накачки мощные импульсы пикосекундной длительности за счет достаточно больших коэффициентов усиления при криогенных температурах активных сред и диодной накачке, применение которых снижает влияние тепловых эффектов на активные элементы и позволяет увеличить частоту следования импульсов до килогерцевого уровня.

Для реализации поэтапного развития фемтосекундной лазерной системы, представленной на рис.1, проведено численное моделирование канала параметрического усиления и определены параметры излучения, позволяющие при наращивании числа каскадов ОРСПА-канала достичь последовательного роста пиковых мощностей на выходе системы от тераваттного до мультитераваттного уровня. Моделирование проводилось с использованием split-step метода [7]. В расчете учитывалось влияние линейных и нелинейных фазовых эффектов на параметрическое усиление фемтосекундных импульсов при пикосекундной накачке, дифракция, определяющая расходимость пучков, снос излучения в результате двулучепреломления, фазовая самомодуляция и кросс-модуляция, а также мелкомасштабная самофокусировка.

Особое значение при анализе параметрического усиления спектрально-широкополосных импульсов придавалось выбору нелинейно-оптических кристаллов с предельно низким поглощением как в области спектра усиления сигнальных частот, так и в области спектра холостых частот, одновременно обладающих высокими значениями коэффициентов нелинейности, пиковых интенсивностей оптического пробоя и ширин спектра усиления при заданном коэффициенте усиления.

Этим условиям в нашем случае в большей степени удовлетворяют кристаллы LBO, имеющие поглощение в области 800–1400 нм  $\sim 10^{-4}$  см<sup>-1</sup> и обеспечивающие спектральную полосу усиления, достаточную для поддержания усиления импульсов длительностью менее 10 фс. По сравнению с кристаллами DKDP, широко применяющимися в параметрических усилителях мощных лазерных систем, кристаллы LBO характеризуются большими коэффициентами нелинейности и большими порогами оптического пробоя ( $\sim 20$  ГВт/см<sup>2</sup>). Коэффициент усиления кристалла LBO по мощности почти в 3 раза выше, теплопроводность в 1.7 раза больше, а коэффициент поглощения в области спектра усиления стартовых фемтосекундных импульсов с центральной длиной волны 1030 нм почти на порядок ниже, чем у кристаллов DKDP.

Расчеты показали, что для поэтапного получения на выходе системы пиковых мощностей от 1 до 100 ТВт при спектральной ширине стартового фемтосекундного излучения  $\sim 300$  нм с пространственным и временным гауссовыми профилями импульсов с длительностью  $\sim 5$  фс и

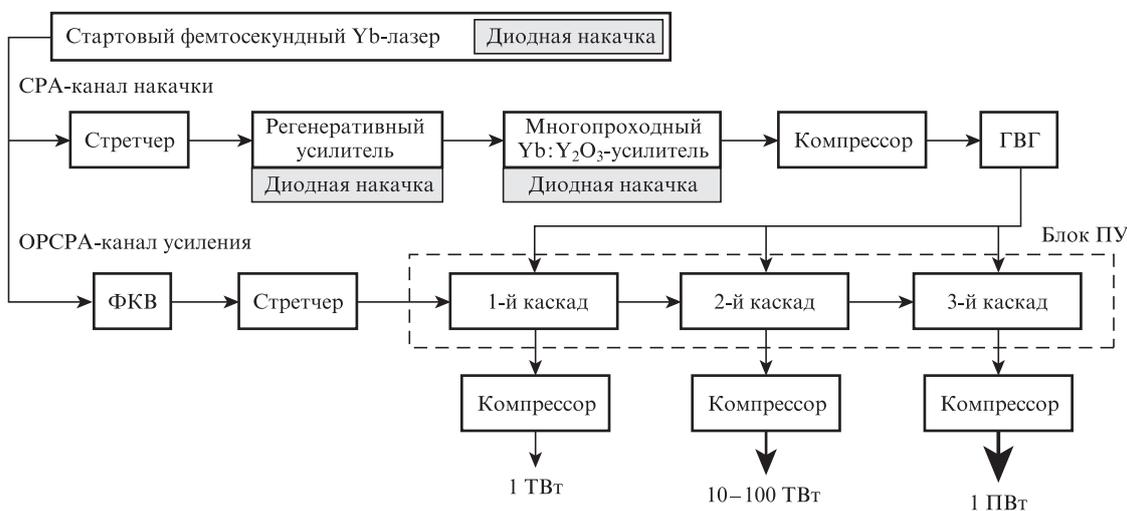


Рис.1. Схема мультитераваттной фемтосекундной лазерной системы с частотой следования импульсов до 1 кГц.

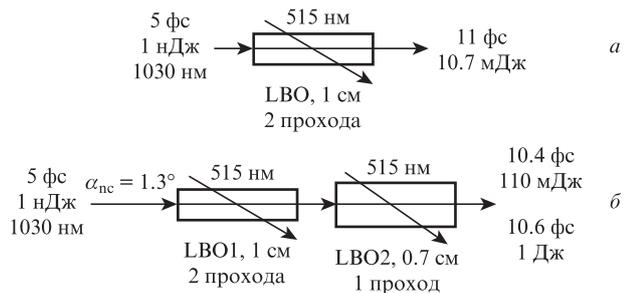


Рис.2. Схемы каскадов параметрического усиления для достижения пиковых мощностей 1 ТВт (а), 10 и 100 ТВт (б).

Табл.1. Параметры каскадов ОРСПА-канала усиления.

Параметр	Выходная мощность каскада (ТВт)		
	1	10	100
Количество кристаллов	1	2	2
Число проходов через 1-й кристалл длиной 1 см	2	2	2
Число проходов через 2-й кристалл длиной 0.7 см	–	1	1
Энергия накачки 1-го кристалла (мДж)	60	6	60
Энергия накачки 2-го кристалла (мДж)	–	500	5000
Энергия усиленных импульсов (мДж)	10.7	110	1000
Длительность усиленных импульсов (фс)	11	10.4	10.6

энергией 1 нДж необходимо использовать конфигурации, представленные на рис. 2. Тераваттный уровень мощности достигается в случае двухпроходной схемы на одном кристалле LBO с размерами 5×5×10 мм (рис.2,а), а для достижения мощностей мультитераваттного (от 10 до 100 ТВт) уровня необходимы уже двухкристальные конфигурации (рис.2,б).

Результаты численного моделирования ОРСПА-канала параметрического усиления при интенсивности излучения накачки на кристаллах не более 8 ГВт/см<sup>2</sup> приведены в табл.1. Для каждого каскада оптимизировались следующие параметры: отношение длительности chirпованного усиливаемого импульса к длительности импульса накачки, относительная задержка между этими импульсами, углы неколлинеарности и углы синхронизма, а также длина кристаллов. Во всех случаях накачка осуществлялась излучением с длительностью импульсов 15 пс, имеющих временной гауссов профиль и гипергауссов профиль 4-го порядка в пространстве, и с длиной волны 515 нм при угле неколлинеарности  $\alpha_{nc} = 1.3^\circ$ .

Число каскадов в схеме является оптимальным для получения максимальной энергии усиленных импульсов при сохранении их длительности в диапазоне 10–11 фс. На рис.3 приведены рассчитанные спектры начальных и усиленных импульсов на каждом этапе усиления и спектры усиленной и холостой волн на выходе системы при усилении до мультитераваттного уровня.

Расчеты показали, что для достижения петаваттного уровня выходной мощности системы (1 ПВт, 10.4 фс, 11 Дж) к конфигурации, рассчитанной на 10 ТВт, необходимо добавить третий однопроходный каскад на кристалле LBO длиной 0.7 см и увеличить энергию накачки до 50 Дж. При этом апертуру элементов из кристаллов LBO требуется увеличить до 100 мм.

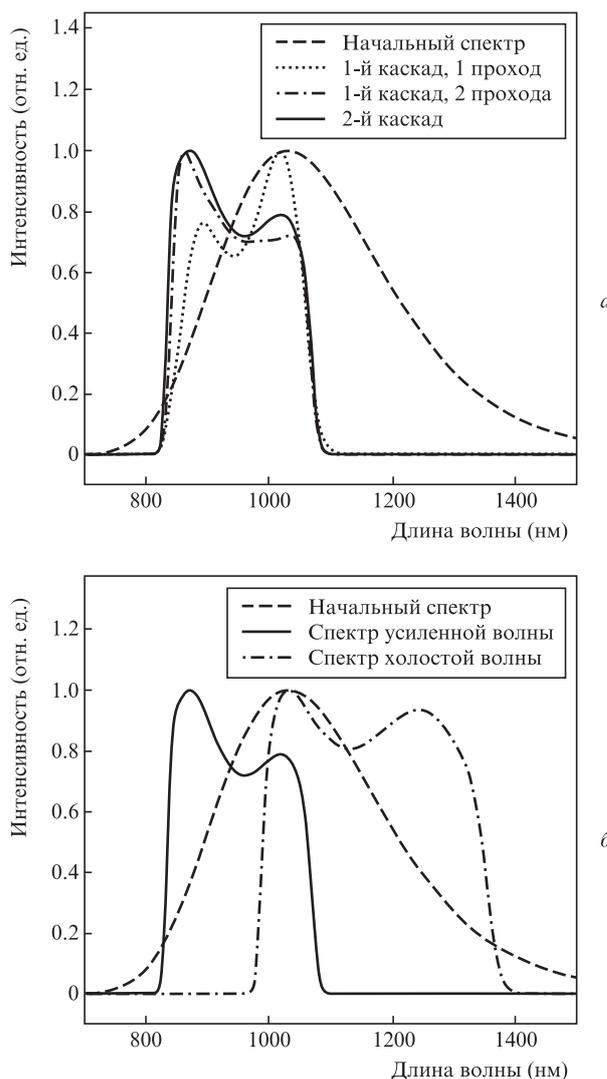


Рис.3. Спектры усиленных импульсов для лазерной системы мощностью 100 ТВт: для усиленной волны в зависимости от количества проходов (а) и для усиленной и холостой волн на выходе из системы (б).

### 3. Генератор стартовых фемтосекундных импульсов и ОРСПА-канал параметрического усиления

В качестве активного элемента стартового фемтосекундного Yb-лазера системы использовалась лазерная керамика Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10 ат.%) толщиной 1.5 мм, помещенная в вакуумный криостат с брюстеровскими окнами [8]. Резонатор был собран по X-образной четырехзеркальной схеме с дополнительной фокусировкой на полупроводниковый насыщающийся поглотитель SESAM. Излучение накачки (диодный лазер, 6 Вт, 975 нм) фокусировалось через угловое зеркало резонатора с радиусом кривизны 100 мм в пятно диаметром ~170 мкм, совпадающим с размером моды резонатора. Режим синхронизации мод обеспечивался SESAM (глубина модуляции 1.2%, плотность энергии насыщения 70 мкДж/см<sup>2</sup>, время релаксации 500 фс, дисперсия групповой скорости –50 фс<sup>2</sup>). Длительность выходных импульсов на центральной длине волны 1030 нм составляла ~300 фс при частоте их следования 68.8 МГц.

Излучение стартового Yb-лазера в канале параметрического усиления проходило через отрезок фотонно-кристаллического волокна SC-5.0-1040 (NKT Photonics, NA = 0.20, диаметр сердцевины 4.8 мкм, нелинейный коэффициент  $11.5 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$ ), в результате чего происходило нелинейное преобразование импульса и расширение его спектра. Было достигнуто десятикратное увеличение спектральной ширины полосы стартового излучения, достаточное для формирования импульсов длительностью  $\sim 10 \text{ фс}$  [9].

После прохождения импульсом стретчера, увеличивающего его длительность до 10 пс, он поступал в 1-й параметрический усилитель. Увеличение длительности импульса в стретчере осуществлялось двумя дифракционными решетками (300 штр./мм, угол падения на первую решетку  $15^\circ$ ) [10]. Диаметр пучка и размер второй дифракционной решетки ( $10 \times 5 \text{ см}$ ) определяли полосу пропускания стретчера.

Для компенсации фазовых искажений, вносимых фотонно-кристаллическим волокном канала усиления, стретчером и элементами параметрического усилителя, и формирования на выходе системы импульса длительностью 10 фс компрессор канала усиления компенсировал чирпы второго, третьего и четвертого порядков с точностью  $12 \text{ фс}^2$ ,  $730 \text{ фс}^3$  и  $8500 \text{ фс}^4$  соответственно [9].

#### 4. СРА-канал накачки параметрических усилителей

В СРА-канале накачки параметрических усилителей лазерной системы для расширения импульса задающего Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-лазера от 250 фс до 1 нс использовался двухпроходный стретчер на базе двух параллельно расположенных голографических дифракционных решеток (1700 штр./мм, порядок дифракции  $m = -1$ ) и сферического зеркала с золотым покрытием ( $R = 1.52 \text{ м}$ ) [10].

Значения квадратичного чирпа после двойного прохода через стретчер и регенеративный усилитель (что соответствует 100 проходам через элемент толщиной 2 мм регенеративного усилителя) составляли  $4.9 \times 10^7$  и  $4 \times 10^4 \text{ фс}^2$  соответственно. Компрессор канала накачки уменьшал длительность импульса с 1 нс до 40 пс с помощью двух параллельно расположенных дифракционных решеток с такими же, как и в стретчере, числом штрихов решеток и углом падения излучения на первую решетку.

Для наращивания мощности излучения в СРА-канале накачки применялся криогенный регенеративный усилитель на кристалле Yb:KYW (частота следования импульсов 1 кГц), увеличивающий энергию излучения задающего генератора с 1 нДж до 1 мДж.

Излучение, усиливаемое в криогенном регенеративном усилителе, имело следующие параметры: частота следования импульсов  $\sim 70 \text{ МГц}$ , центральная длина волны 1030 нм, энергия входного импульса  $\sim 1 \text{ нДж}$ , длительность импульса не менее 250 пс. Коэффициент усиления по энергии составлял  $\sim 10^6$ . Для согласования положений и диаметров входного пучка и основной моды в резонаторе регенеративного усилителя использовался телескоп Галилея с коэффициентом передачи 0.9. На рис.4 представлены зависимости пиковой энергии на выходе регенеративного усилителя от мощности диодной накачки при комнатной и криогенной температурах активной среды. Эксперименты показали, что при охлаждении кристалла до температуры жидкого азота и увеличении числа проходов до 100 максимальная пиковая энергия на выходе

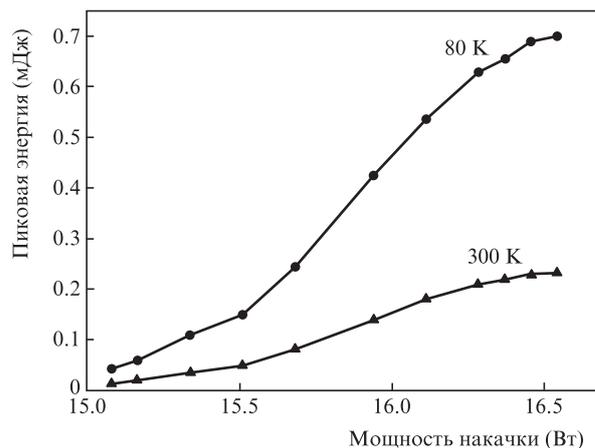


Рис.4. Зависимости пиковой энергии на выходе регенеративного усилителя (1 кГц) от мощности накачки при температурах активного элемента 300 и 80 К.

регенеративного усилителя составляет 700 мкДж. Дальнейшее повышение мощности накачки приводило к пробое оптических покрытий элементов усилителя.

При разработке многопроходного усилителя СРА-канала накачки системы был проведен сравнительный анализ физических свойств ряда оксидных лазерных керамик и кристаллов (Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Yb:YAG и Yb:LuAG) (табл.2) с целью выбора наиболее эффективной активной среды для работы при криогенных температурах с высокой частотой следования импульсов. Результаты численного моделирования показали преимущество использования лазерной керамики на основе Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис.5). Для этой лазерной керамики было проанализировано влияние профилей пучков излучения и накачки на уровень энергии выходного сигнала, зависимости выходной энергии от радиуса перетяжки усиливаемого излучения, выходной энергии усиливаемого сигнала от падающей мощности накачки [17] и усиления слабого сигнала от поглощенной энергии в активной среде. Установлено преимущественное влияние плотности энергии накачки и температуры активной среды на коэффициент усиления и эффективность работы усилителя.

Для перехода к криогенным температурам экспериментально измерено и рассчитано сечение усиления ак-

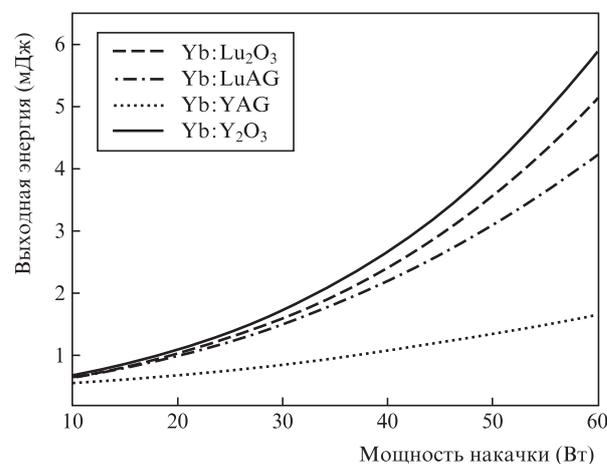
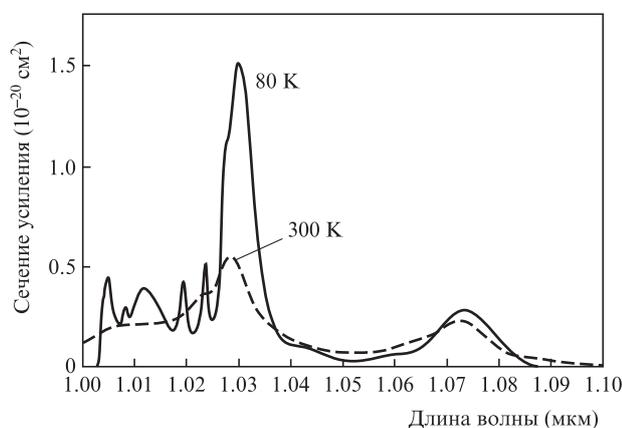


Рис.5. Зависимости выходной энергии усиливаемого излучения от мощности накачки; диаметры пучков накачки и усиливаемого сигнала на элементе 0.5 мм.

Табл.2. Теплофизические и лазерные свойства сред, активированных иттербием, при комнатной и криогенной температурах.

Параметр	Активная среда				
	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	YAG	LuAG
$\alpha_{300\text{K}}$ ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )	7.4 [12]	6.7 [12]	5.5 [12]	6.1 [12]	6 [11]
$\alpha_{123\text{K}}$ ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )	1.5 <sub>80\text{K}}</sub> [16]	2.3 [12]	2.9 [12]	2.9 [12]	–
$K_{300\text{K}}$ ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ )	12.8 [11]	15.5 [11]	12.5 [11]	10.5 [11]	9 [11]
$K_{\sim 100\text{K}}$ ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ )	60 <sub>80\text{K}}</sub> [16]	–	–	38 <sub>102\text{K}}</sub> [16]	–
$dn/dT_{270\text{K}}$ ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )	9 [12]	–21.4 [12]	8.18 [12]	10.16 [12]	8.3 [13]
$dn/dT_{90\text{K}}$ ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )	2.3 <sub>80\text{K}}</sub> [16]	–9.43 [12]	<–5.4 [12]	0.9 <sub>100\text{K}}</sub> [16]	–
$D_{300\text{K}}^*$ ( $\text{м}^{-1}\cdot\text{Вт}^{-1}$ )	1.42	3.2	–	1.2	–
$\sigma_{\text{аб } 300\text{K}}$ ( $10^{-20} \text{ см}^2$ ) / $\lambda_{\text{аб}}$ (нм)	2.4 [14] / 976.7	4.4 [14] / 975.1	3 [14] / 976	0.83 [14] / 968.8	0.67 [15] / 969
$\sigma_{\text{ем } 300\text{K}}$ ( $10^{-20} \text{ см}^2$ )	1 [14]	1.4 [14]	1.28 [14]	1.9 [14]	1.75 [15]
$\tau_{300\text{K}}$ (мс)	0.85 [14]	0.8 [14]	0.82 [14]	1 [14]	0.99 [15]
$\lambda_{\text{ем } 300\text{K}}$ (нм)	1031 [14]	1041 [14]	1032 [14]	1030 [14]	1030 [15]

Примечание: \* – экспериментальные данные, полученные в настоящей работе;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;  $K$  – теплопроводность;  $n$  – показатель преломления;  $D$  – приведенная оптическая сила тепловой линзы;  $\sigma_{\text{аб/ем}}$  – сечение поглощения/излучения;  $\tau$  – время жизни возбужденного состояния;  $\lambda_{\text{ем}}$  – длина волны излучения.

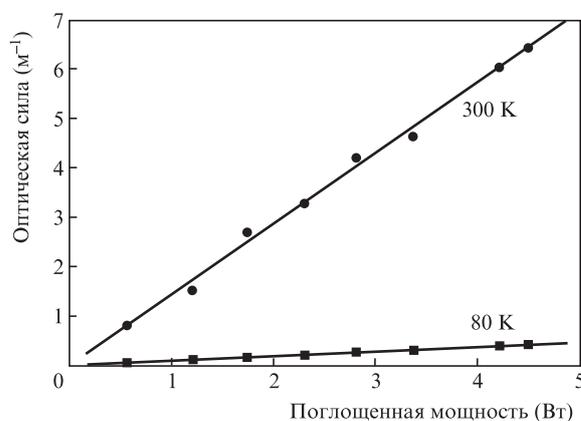
Рис.6. Сечения усиления активного элемента из керамики Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при  $T = 300$  и  $80$  К для параметра  $\beta = 0.6$ .

тивного элемента из керамики Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при комнатной и криогенной температурах (рис.6). Сечение усиления  $\sigma_g$  рассчитывалось на основе измеренных сечений поглощения  $\sigma_{\text{аб}}$  и излучения  $\sigma_{\text{ем}}$  по следующей формуле:  $\sigma_g = \sigma_{\text{аб}}(1 - \beta) + \sigma_{\text{ем}}\beta$ , где  $\beta = N_1/(N_1 + N_2)$  – отношение населенности верхнего лазерного уровня  $N_1$  к общей населенности уровней генерации  $N_1 + N_2$ . Сечение усиления лазерной керамики Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на длине волны 1030 нм при переходе в криогенный режим возрастает в три раза.

Анализ рассчитанной температурной зависимости КПД накачки по запасенной энергии (отношение запасенной в элементе энергии к энергии накачки на входе в активный элемент) [18] показал, что при переходе к криогенным температурам КПД накачки возрастет для иттриевой керамики с 52% (при 300 К) до 65% (при 80 К).

Для экспериментального определения оптической силы тепловой линзы было измерено изменение фокусного расстояния в зависимости от поглощенной мощности диодной накачки. С учетом данных, представленных в табл.2, оптическая сила тепловой линзы изменяется на величину  $D_{300}/D_{80} = 15.6$ . Зависимость оптической силы тепловой линзы от поглощенной мощности накачки представлена на рис.7.

При понижении температуры до криогенной (80 К) лазерные среды, активированные ионами Yb<sup>3+</sup>, начинают работать по четырехуровневой схеме, что приводит к

Рис.7. Зависимости оптической силы тепловой линзы от поглощенной мощности накачки в лазерной керамике Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при  $T = 300$  и  $80$  К.

значительному росту их эффективности и снижению тепловой нагрузки на активный элемент.

Для повышения эффективности и увеличения выходной энергии многопроходного усилителя до 300–400 мДж конструктивно он был разбит на две ступени, первая из которых накачивалась диодами мощностью до 100 Вт, а вторая – диодами киловаттного уровня. Для первой ступени усиления была разработана оптическая схема четырехпроходного усилителя на керамике Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> типа «галстук-бабочка» (bow-tie). Результаты расчетов режимов работы первой ступени при входной энергии 0.5 мДж и диаметрах пучков накачки и сигнала 1 мм при комнатной и криогенной температурах представлены на рис.8. Необходимо отметить, что понижение температуры активного элемента первой ступени до 80 К приводит к сужению спектра усиления и сдвигу центральной длины волны импульса в синюю область спектра примерно на 2 нм.

Работа второй ступени анализировалась при диодной накачке излучением киловаттной мощности. На рис.9 показана расчетная зависимость выходной энергии излучения после усиления во второй ступени многопроходного усилителя с накачкой до 1.5 кВт при начальных энергиях усиливаемого импульса 0.5 и 15 мДж, получаемых в первой ступени усиления при 300 и 80 К соответственно. Анализ проводился для криогенных температур актив-

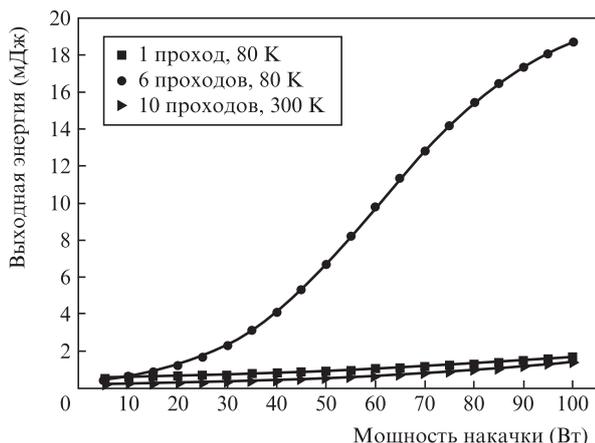


Рис. 8. Зависимости выходной энергии усиливаемого излучения первой ступени многопроходного усилителя от мощности накачки при комнатной и криогенной температурах активного элемента  $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$ .

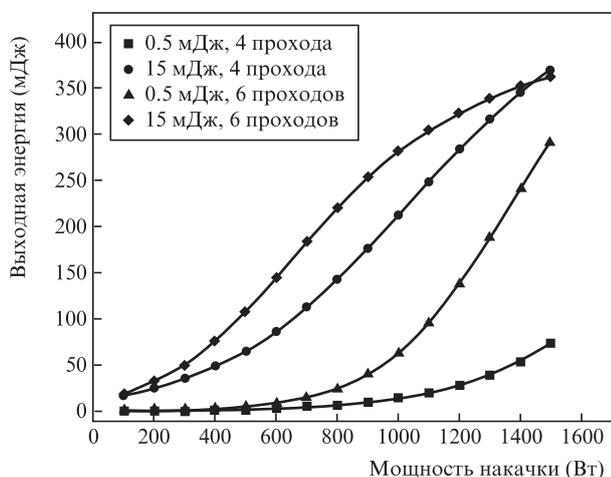


Рис. 9. Зависимости выходной энергии усиливаемого излучения второй ступени многопроходного усилителя от мощности накачки для 4 и 6 проходов при входной энергии  $E_{in} = 0.5$  и  $15$  мДж ( $T = 80$  К).

ной среды из керамики  $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$  при толщине активного элемента  $1.5$  мм и диаметрах пучков накачки и сигнала  $4$  мм. Из рис. 9 следует, что криогенный режим двухступенчатого многопроходного усилителя позволяет повысить выходную энергию до  $350$  мДж, что достаточно для реализации тераваттного этапа создания мультикВт лазерной системы, работающей с кГц частотой следования импульсов.

## 5. Заключение

Разработана элементная база высокоинтенсивной твердотельной лазерной системы, способная функционировать с высокой частотой следования импульсов при оптической синхронизации канала параметрического усиления фемтосекундных импульсов в нелинейно-оптических кристаллах и канала накачки импульсами пикосекундной длительности параметрических усилителей на активных иттербиевых кристаллических и керамических средах, на-

качиваемых излучением лазерных диодов. Разработаны конфигурации оптических схем и проведены расчеты поэтапного увеличения выходной мощности канала усиления до субкВт уровня на основе параметрического усиления в кристаллах LBO при пикосекундной накачке.

На созданной элементной базе в канале накачки лазерной системы экспериментально исследованы параметры предварительного усилителя пикосекундного излучения с выходной энергией  $\sim 1$  мДж на длине волны  $1030$  нм с  $f = 1$  кГц. Разработана оптимальная оптическая схема каскадного многопроходного криогенного усилителя на лазерных керамиках  $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$  с накачкой излучением кГц диодных лазеров для достижения выходной энергии в диапазоне  $0.25$ – $0.35$  Дж, экспериментальные исследования особенностей работы которой составят предмет дальнейших исследований.

Авторы выражают благодарность С.Н.Багаеву за внимание и поддержку данной работы и А.В.Кирпичникову за помощь в исследованиях.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения» и гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ №НШ-4096.2014.

1. Коржиманов А.В., Гоносков А.А., Хазанов Е.А., Сергеев А.М. *УФН*, **181** (1), 9 (2011).
2. <http://www.extreme-light-infrastructure.eu/pictures/ELI-scientific-case-id17.pdf>.
3. Major Z., Trushin S.A., Ahmad I., Siebold M., Wandt C., Klingebiel S., Wang T., Fülöp J.A., Henig A., Kruber S., Weingartner R., Popp A., Osterhoff J., Hörlein R., Hein J., Pervak V., Apolonski A., Krausz F., Karsch S. *Rev. Laser Eng.*, **37** (6), 431 (2009).
4. Chanteloup J.C., Albach D. *IEEE Photon.*, **3**, 245 (2011).
5. Mason P.D., Banerjee S., Ertel K., Phillips P.J., Greenhalgh J., Collier J.L. *Plasma Fusion Res.*, **8**, 3404051 (2013).
6. Divoky M., Sawicka M., Sikocinski P., Lucianetti A., Novak J., Rus B., Mocek T. *EPJ Web Conf.*, **59**, 08004 (2013).
7. Агравал Г. *Нелинейная волновая оптика* (М.: Мир, 1996).
8. Петров В.В., Пестряков Е.В., Трунов В.И., Кирпичников А.В., Мерзляков М.А., Лаптев А.В. *Оптика атмосферы и океана*, **25** (3), 285 (2012).
9. Petrov V.V., Pestryakov E.V., Laptev A.V., Frolov S.A., Trunov V.I., Kirpichnikov A.V. *Techn. Dig. Intern. Conf. ICONO/LAT 2013*, (Moscow, Russia, 2013, paper LWE5, p.24).
10. Laptev A.V., Polyakov K.V., Petrov V.V., Pestryakov E.V. *Techn. Dig. XV Intern. Conf. Laser Optics* (St. Petersburg, Russia, 2012, paper YS\_0521).
11. Sanghera J., Shaw B., Kim W., Villalobos G., Baker C., Frantz J., Hunt M., Sadowski B., Aggarwal I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7912**, 79121Q-1 (2011).
12. Cardinali V., Marmois E., Le Garrec B., Bourdet G. *Opt. Mater.*, **34**, 990 (2012).
13. Beil K., Friedrich-Thornton S. T., Tellkamp F., Peters R., Kränkel C., Petermann K., Huber G. *Opt. Express*, **18** (20), 20712 (2010).
14. Peters V., *Growth and Spectroscopy of Ytterbium-doped Sesquioxides, Dissertation* (Institute für laser-physik, Universität Hamburg, 2011).
15. Cheng S., Xu X., Li D., Zhou D., Wua F., Zhao Z., Xu J. *Opt. Mater.*, **33**, 112 (2010).
16. Tso Yee Fan, Ripin D.J., Aggarwal R. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13** (3), 448 (2007).
17. Koechner W., Bass M. *Solid-State Lasers* (Oxford: Oxford Univ. Press, 2003, pp 137–198).
18. Перевезенцев Е.А., Мухин И.Б., Палашов О.В., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **39** (9), 807 (2009).