

УДК 535:621.373.826

Канал накачки параметрического усилителя тераваттной фемтосекундной Yb-лазерной системы

В.В. Петров¹, Е.В. Пестряков¹, А.В. Лаптев¹, В.А. Петров^{1,2}, Г.В. Купцов^{1,2*}

¹Институт лазерной физики СО РАН

630090, г. Новосибирск, пр. Академика М.А. Лаврентьева, 13/3

²Новосибирский государственный технический университет

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Поступила в редакцию 15.10.2013 г.

Представлены результаты исследований компонент разрабатываемой фемтосекундной тераваттной лазерной системы с частотой следования импульсов 1 кГц. Система состоит из двух оптически синхронизованных каналов: канала усиления на основе параметрического усилителя с кристаллом LBO и канала накачки на базе лазерных сред, активированных ионами Yb³⁺, при температуре 80 К с диодной накачкой. В канале накачки формируются импульсы пикосекундной длительности. При создании обоих каналов используется принцип усиления chirпованных импульсов. Для канала накачки определены параметры и юстировочные требования на настройку системы «стретчер–компрессор» на голографических решетках. Разработан многопроходный усилитель на керамике Yb:Y₂O₃ при температуре жидкого азота с диодной накачкой до 1 кВт. Представленные данные могут быть использованы при создании криогенных мультикаскадных фемтосекундных лазерных систем с частотой следования импульсов порядка 1 кГц.

Ключевые слова: фемтосекундные импульсы, криогенные температуры, лазерная диодная накачка, многопроходный усилитель, система «стретчер–компрессор»; femtosecond pulses, cryogenic temperature, laser diode pumping, multipass amplifier, stretcher–compressor.

Введение

В основу развития мощных фемтосекундных лазерных систем заложены принципы параметрического и лазерного усиления, которые совместно с техникой усиления chirпованных импульсов [1, 2] позволяют получать пиковые мощности петаваттного уровня. Перспективными лазерными средами для таких систем являются среды, активированные ионами Yb³⁺. С развитием технологии мощных полупроводниковых лазеров с длиной волны генерации около 1 мкм появилась возможность эффективной накачки твердотельных лазерных сред, активированных ионами иттербия, и как следствие, создания мощных лазерных систем с килогерцовым уровнем частоты повторения импульсов и длительностью импульса около 100 фс.

Создаваемая фемтосекундная лазерная система основана на Yb³⁺-активированных керамических и кристаллических средах (Yb:Y₂O₃, Yb:KYW и др.) [3]. Основной принцип базируется на параметрическом и лазерном усилении chirпованных импульсов. Общая схема установки представлена на рис. 1.

Задающий генератор на керамике Yb:Y₂O₃ ($\lambda = 1030$ нм) при температуре жидкого азота излучает импульсы с частотой 70 МГц и длительностью 250 фс. Принципиально схема разделена на канал накачки и канал усиления. Канал накачки состоит из стретчера, регенеративного, многопроходного усилителей, компрессора и нелинейного кристалла LBO. Выходное излучение канала накачки далее поступает в параметрический усилитель канала усиления. Канал усиления состоит из фотонно-кристаллического волокна для расширения спектра излучения до уровня ~300 нм (что соответствует длительности импульса ~5–7 фс), стретчера, параметрического усилителя на основе кристалла LBO и компрессора. Выходными параметрами создаваемой фемтосекундной лазерной системы являются: длительность импульса 5–7 фс, энергия в импульсе 5–7 мДж, частота повторения импульсов 1 кГц и пиковая мощность 1 ТВт.

В настоящей статье рассматривается канал накачки параметрического усилителя с основными компонентами: система «стретчер–компрессор» и многопроходный усилитель.

Система «стретчер–компрессор»

Методика усиления chirпованных импульсов является основой создания современных мощных лазерных систем. Длительность импульса лазера сверхкоротких импульсов увеличивается во времени с помощью стретчера, далее усиливается и сжимается в компрессоре до первоначальной длительности.

* Виктор Валерьевич Петров (vpetv@laser.nsc.ru); Ефим Викторович Пестряков (pefvic@laser.nsc.ru); Алексей Викторович Лаптев (alex_laptev@ngs.ru); Владимир Анатольевич Петров (petrov.nstu@gmail.com); Глеб Владимирович Купцов (kuptsov.gleb@gmail.com).

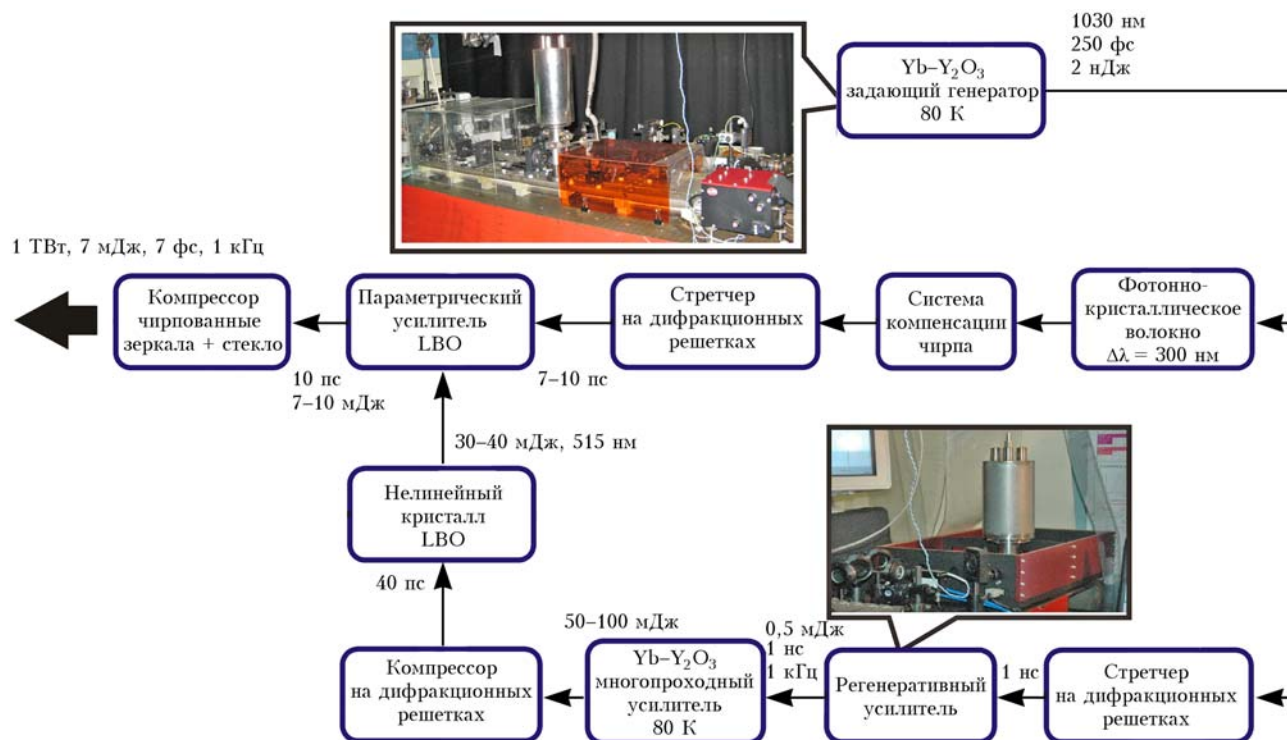


Рис. 1. Схема тераваттной фемтосекундной лазерной системы на средах, активированных ионами иттербия, с диодной накачкой и частотой следования импульсов 1 кГц

Для стретчера канала накачки создаваемой фемтосекундной лазерной системы выбрана схема, состоящая из двух параллельных голографических решеток, сферического зеркала и возвратного зеркала. Поверхность оптических элементов покрыта золотом. Схема компрессора аналогична стретчеру, но без сферического зеркала. Использование только отражательных элементов позволяет снизить хроматические aberrации и уменьшить критичность настройки оптических элементов. Можно показать, что эквивалентной схемой для стретчера является схема из двух решеток с отрицательным расстоянием между ними. Из теоретических расчетов [4] следует, что в системах усиления чирпованных импульсов при использовании дифракционных решеток возможна полная компенсация фазовых искажений, определяемых дисперсией групповых скоростей второго, третьего и четвертого порядка.

Для увеличения длительности импульса от 250 фс до 1 нс и его последующего сжатия в 40 пс были определены параметры системы «стретчер–компрессор»: голографические дифракционные решетки 1700 штр./мм, угол падения на первую решетку $65,5^\circ$, радиус кривизны сферического зеркала 1,5 м, эквивалентное расстояние между решетками в стретчере $L_{\text{стретч}} = 1,27$ м, расстояние между решетками в компрессоре $L_{\text{компр}} = 1,21$ м.

Основной сложностью при настройке системы «стретчер–компрессор» является неполное сжатие импульса вследствие искажений, которые могут быть разделены на два типа: искажения формы и длительности импульса, вызванные высшими порядками дисперсии групповой задержки, и пространственная неоднородность по сечению луча,

обусловленная изменением групповой задержки по сечению. Среди факторов, вызывающих эти искажения, могут быть выделены следующие: рассогласование расстояния между решетками в системе «стретчер–компрессор», рассогласование угла падения на первую решетку, непараллельность решеток в плоскости, перпендикулярной плоскости дифракции, непараллельность решеток в плоскости дифракции, непараллельность штрихов решеток [4].

Расчеты показали, что для увеличения длительности импульса от 250 фс до 1 нс и его последующего сжатия в 40 пс необходимо установить расстояние между решетками с точностью не более 5 мм, углы непараллельности решеток в плоскости дифракции и перпендикулярной ей должны составлять 1 и 7° соответственно, угол непараллельности штрихов решеток 5° .

Многопроходный криогенный усилитель

Для увеличения мощности излучения в канале накачки параметрического усилителя в качестве первого каскада применяется регенеративный усилитель на кристалле Yb:KYW (частота повторения импульсов 1 кГц), усиливающий энергию излучения задающего генератора с 1 нДж до $\sim 0,5$ мДж. В качестве второго каскада усиления разработан многопроходный усилитель, усиливающий излучение первого каскада до 50–100 мДж. Проведен сравнительный анализ лазерных сред, активированных ионами иттербия, который показал, что оптимальным активным элементом для усилителя является керамика Yb:Y₂O₃. На рис. 2 представлена зависимость

энергии усиленного импульса при комнатной температуре активного элемента как функция мощности накачки для сред Yb:Y₂O₃, Yb:Lu₂O₃, Yb:LuAG, Yb:YAG с концентрацией ионов Yb³⁺ ~ 10 ат% после четырех проходов через активные элементы, толщины элементов 2 мм, диаметры пучков накачки и усиливаемого сигнала на элементе 0,5 мм.

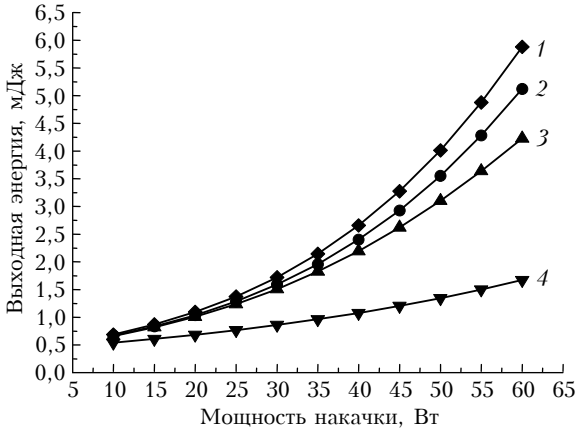


Рис. 2. Зависимость выходной энергии усиливаемого излучения от мощности накачки для сред Yb:Y₂O₃ (1), Yb:Lu₂O₃ (2), Yb:LuAG (3), Yb:YAG (4)

При понижении температуры до криогенной (80 К) лазерные среды, активированные трехвалентными ионами иттербия, начинают работать по четырехуровневой схеме, что приводит к значительному повышению их эффективности и снижению тепловой нагрузки на активный элемент.

Выражение, описывающее изменение энергии усиливаемого импульса за один проход в усилителе [5], имеет вид

$$E_{out} = AF_s \ln \left(1 + G \left[\exp \left(\frac{F_{in}}{F_s} \right) - 1 \right] \right), \quad (1)$$

где A – поперечное сечение входного пучка; F_{in} – плотность энергии входного сигнала, F_s – плотность энергии насыщения; G – усиление слабого сигнала, которое изменяется от прохода к проходу согласно формуле

$$G(k) = \exp \left(\frac{F_{sto}(k)}{E_s} \right). \quad (2)$$

Выражения (1), (2) используются столько раз, сколько имеется проходов через усиливающую среду. Запасенная в активной среде плотность энергии F_{sto} изменяется от числа проходов как

$$F_{sto}(k+1) = \left[1 - \frac{F_{out}(k) - F_{in}}{F_{sto}} \right] F_{sto}(k), \quad (3)$$

где k – индекс, соответствующий номеру прохода; F_{out} – плотность энергии выходного сигнала.

Нами было проанализировано влияние соотношения диаметров пучков излучения и накачки на уровень энергии выходного сигнала, зависимости выходной энергии усилителя от радиуса перетяжки усиливаемого излучения, выходной энергии усиливаемого сигнала от мощности падающей накачки

(рис. 3) и усиления слабого сигнала от количества поглощенной энергии в активной среде. Анализ показывает преимущественное влияние плотности энергии накачки на коэффициент усиления и эффективность работы усилителя.

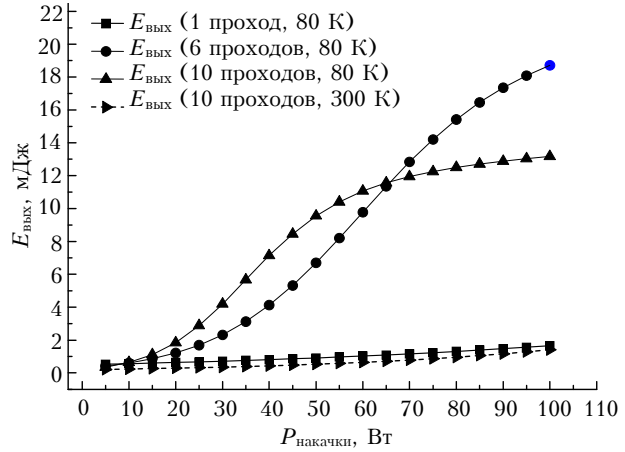


Рис. 3. Зависимость выходной энергии усиливаемого излучения от мощности накачки для разных температур, диаметры пучков накачки и усиливаемого сигнала на элементе – 1 мм

Необходимо отметить, что при понижении температуры элемента с 300 до 80 К происходит сдвиг центральной длины волны импульса в красную область спектра на величину порядка ~2 нм и наблюдается сужение спектра.

Для получения мультитераваттного уровня мощности импульсов в канале усиления был предложен дополнительный каскад накачки, который существенно увеличивает эффективность работы основного каскада и выходную мощность излучения. В качестве дополнительного каскада усиления был разработан промежуточный четырехпроходный усилитель на керамике Yb:Y₂O₃, работающий при температуре жидкого азота, который увеличивает уровень сигнала с 0,5 до 10–15 мДж. Добавление промежуточного четырехпроходного усилителя в канал накачки параметрического усилителя приводит к повышению уровня энергии после основного многопроходного усилителя до ~250 мДж.

На рис. 4 представлена оптическая схема промежуточного четырехпроходного усилителя. Для достижения наибольшей эффективности по накачке в данной схеме используются два источника накачки по 30 Вт с каждой стороны, необходимые для создания равномерной инверсии населенностей во всем объеме активного элемента (АЭ), который находится в криостате. Излучение накачки заводится в активный элемент с помощью плоских зеркал $Pm1$ и $Pm2$.

Усиливаемое излучение на входе в многопроходный усилитель имеет диаметр 3 мм и уровень энергии ~0,5 мДж. Проходя через линзу с фокусным расстоянием 790 мм, оно фокусируется в активном элементе в пятно диаметром 0,5 мм с помощью зеркал $M1$ и $M2$. Остальные оптические элементы схемы многопроходного усилителя поддерживают то же значение диаметра усиливаемого излучения в активном элементе на каждом проходе.

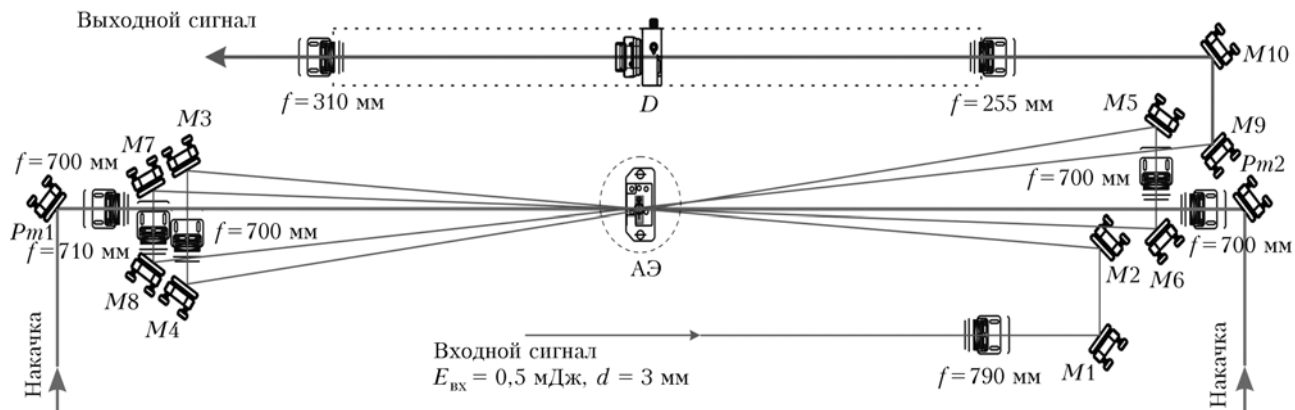


Рис. 4. Оптическая схема четырехпроходного усилителя

На выходе оптической схемы многопроходного усилителя находится пространственный фильтр, образованный двумя линзами с фокусными расстояниями 255 и 310 мм соответственно и диафрагмой D . Он необходим для пространственной фильтрации усиленного излучения, поскольку при многопроходном усилении пространственный профиль пучка искажается за счет несовпадения распределения поля рабочей области пучка накачки и усиливаемого излучения.

Необходимо отметить, что для реализации многопроходного усиления в любой геометрии требуется длиннофокусная оптика. Это необходимо для обеспечения согласования рабочей области активного элемента, в которой организована инверсия населенностей с усиливаемым излучением. Использование длиннофокусной оптики позволяет максимально согласовывать рабочую область с усиливаемым излучением.

В некоторых случаях использование такой оптики затруднено из-за небольшого конфокального параметра усиливаемого сигнала. В результате рабочая область активного элемента и область, через которую проходит усиливаемое излучение, становятся несогласованными, а это приводит к понижению эффективности многопроходного усиления.

Заключение

Представлены результаты расчетов для основных блоков накачки параметрического усилителя тераваттной фемтосекундной Yb -лазерной системы: «системы стретчер–компрессор» и многопроходного криогенного усилителя. Определены параметры и юстировочные требования на настройку системы «стретчер–компрессор».

V. V. Petrov, E. V. Pestryakov, A. V. Laptev, V. A. Petrov, G. V. Kuptsov. Pump channel of parametric amplifier of terawatt femtosecond Yb laser system.

In this paper, we have presented some components of a designed terawatt femtosecond laser system with the repetition rate 1 kHz. The system consists of pump and amplification channels which are optically synchronized. The amplification and pump channels are based on parametric amplification in LBO crystal and diode-pumped Yb^{3+} -doped laser media at 77 K, respectively. In the pump channel pulses of picoseconds duration are generated. These pulses pump the non-linear crystal of the parametric amplifier. The system is based on the chirped-pulse amplification technique. For the pump channel, parameters and alignments of the holographic gratings-based stretcher compressor system are determined. The $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$ ceramics multipass amplifier operating at 77 K diode-pumped by 1 kW was developed. The data can be used in the development of cryogenic multi-stage femtosecond laser systems working with high a repetition rate in the kilohertz regime.

Выбрана усилительная среда, и рассчитан многопроходный усилитель на основе керамики $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$ с центральной длиной волны 1030 нм, работающий при температуре жидкого азота. Определено оптимальное число проходов, и рассчитано спектральное распределение энергии усиливаемого излучения на выходе многопроходного усилителя.

Разработана оптическая схема четырехпроходного усилителя с накачкой 60 Вт, который необходим для повышения уровня энергии с 0,5 до ~5–15 мДж для увеличения эффективности работы основного усилителя. Добавление промежуточного четырехпроходного усилителя в канал накачки параметрического усилителя приводит к повышению уровня энергии после основного многопроходного усилителя с 150 до ~250 мДж при мощности накачки 1 кВт.

Исследование выполнено при поддержке программы президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения» и Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 8387.

1. *Akhmanov S.A., Khokhlov R.V.* Concerning one possibility of amplification of light waves // *Sov. Phys. JETP*. 1963. V. 16. P. 252–257.
2. *Strickland D., Mourou G.* Compression of optical pulses // *Opt. Commun.* 1985. V. 56, N 3. P. 219–221.
3. *Petrov V.V., Pestryakov E.V., Trunov V.I., Kirpichnikov A.V., Merzliakov M.A., Laptev A.V.* Development of cryogenic diode-pumped Yb-doped ceramic laser system // *Atmos. Ocean. Opt.* 2012. V. 25, N 3. P. 285–291.
4. *Fiorini C., Sauteret C., Rouyer C.* Temporal aberrations due to misalignment of a stretcher-compressor and compensation // *IEEE J. Quantum. Electron.* 1994. V. 30, N 7. P. 1662–1670.
5. *Koechler W., Bass M.* Solid state lasers: a graduate text. Springer, 2003. P. 121.