

УДК 621.373.826

СИСТЕМА РЕГЕНЕРАТИВНОГО УСИЛЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Руденков А.С., Кисель В.Э., Гулевич А.Е., Кулешов Н.В.

НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь

Представлена система регенеративного усиления фемтосекундных лазерных импульсов, позволяющая получать лазерные импульсы с пиковой мощностью >1 ГВт и длительностью около 330 фс при частоте следования 1–10 кГц. Данная система предназначена для использования в спектроскопии методом возбуждения-зондирования с высоким временным разрешением, а также других приложениях, требующих высокой пиковой мощности и частоты повторения импульсов, в частности для накачки оптических параметрических генераторов света с целью получения фемтосекундных импульсов в ИК-области спектра. (E-mail: Alex_Electron@bk.ru)

Ключевые слова: регенеративный усилитель, фемтосекундные импульсы, диодная накачка, усиление чирпированных импульсов.

Введение

В последние десятилетия наблюдается значительный прогресс в области лазеров ультракоротких импульсов. Фемтосекундные лазеры становятся более компактными, надежными и коммерчески доступными. Перечень применений ультракоротких импульсов быстро расширяется и требования, предъявляемые к современным лазерным системам, становятся более высокими. Большинство современных лазерных систем, используемых для спектроскопии высокого временного разрешения методом возбуждения-зондирования, используют усиление чирпированных импульсов [1]. Это позволяет увеличить энергию ультракоротких импульсов (УКИ) с наноджоулевого уровня до микро- и миллиджоулевого диапазона. Для увеличения скорости накопления результатов требуются частоты повторения импульсов более 1 кГц, что легко реализуется в системах усиления УКИ на иттербий-содержащих материалах [2]. Материалы, легированные ионами Yb^{3+} , обладают интенсивными полосами поглощения в области 980 нм и широкими полосами усиления, что необходимо для получения импульсов фемтосекундной длительности. В качестве источников накачки используются коммерчески доступные InGaAs лазерные диоды, имеющие большой диапазон выходных мощностей (до

нескольких кВт) в непрерывном режиме. Структура энергетических уровней иона Yb^{3+} исключает потери, связанные с поглощением из возбужденного состояния, ап-конверсией, концентрационным тушением люминесценции [3]. Низкий квантовый дефект (разность энергий квантов накачки и генерации) обеспечивает низкое тепловыделение в активном элементе (длина волны накачки 980 нм, генерации – 1020–1050 нм).

Целью данной работы было создание компактной системы регенеративного усиления ультракоротких лазерных импульсов с высокими частотами следования (до 10 кГц), высокой энергией импульсов (до 360 мкДж), малой длительностью импульсов (около 330 фс), использующей в качестве источников накачки коммерчески доступные, экономичные InGaAs лазерные диоды.

Система регенеративного усиления

В данной работе детально рассмотрены экспериментальные результаты разработки системы регенеративного усиления фемтосекундных лазерных импульсов на кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ ($\text{Yb}:\text{KGW}$) с накачкой InGaAs лазерными диодами в области 980 нм. Схема разработанной системы усиления УКИ представлена на рисунке 1.

Цуг УКИ из задающего генератора 1 попадает в селектор импульсов 3, который снижает ча-

стоту следования импульсов. Для предотвращения обратного отражения излучения в задающий генератор, в схеме предусмотрен изолятор 2, основанный на эффекте Фарадея. Растяжение селектированного импульса во времени осуществляется в стретчере 4. Затем растянутый во времени импульс попадает в усилитель 6. Развязка входного и выходного импульсов осуществляет-

ся изолятором Фарадея 5. Сокращение длительности усиленного импульса осуществляется в компрессоре лазерных импульсов 7. Рассмотрим детально параметры отдельных узлов системы. В качестве источника УКИ используется $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ ($\text{Yb}:\text{KYW}$) лазер с пассивной синхронизацией мод. Выходные параметры лазера представлены в таблице 1.

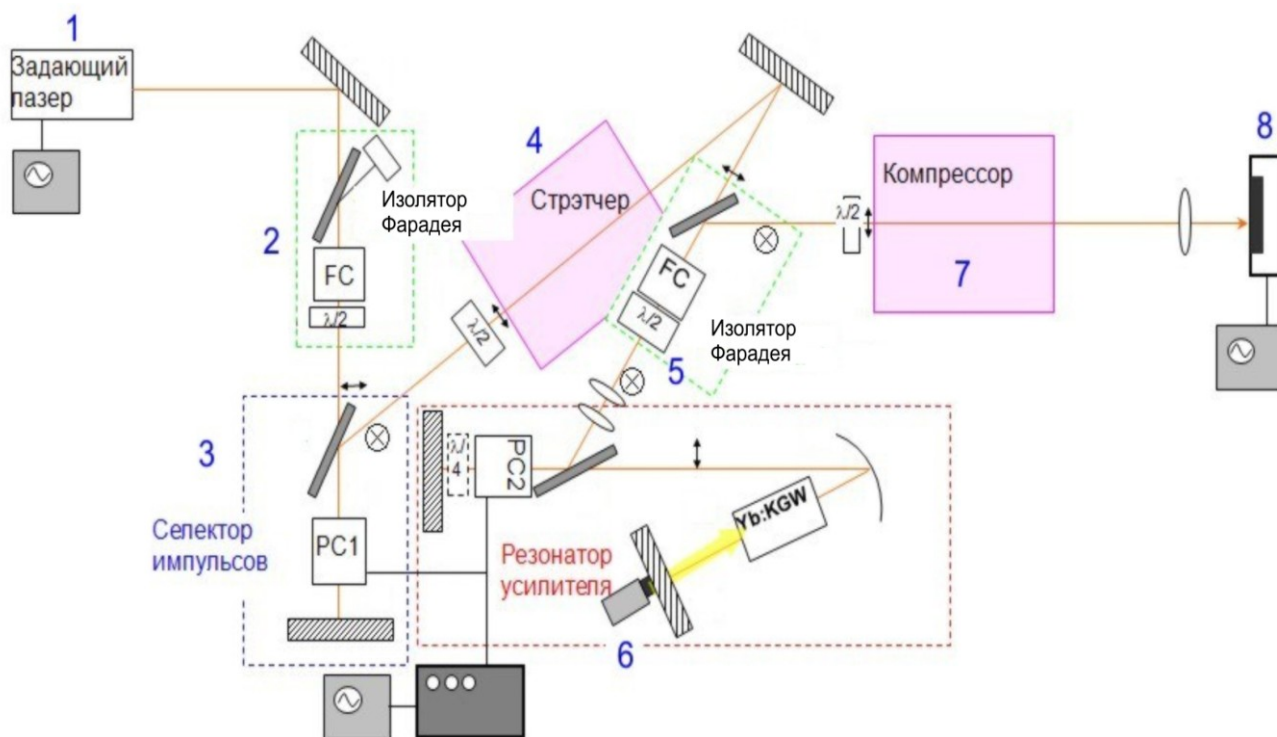


Рисунок 1 – Схема регенеративного усилителя: 1 – задающий лазер; 2, 5 – изоляторы Фарадея; 3 – селектор импульсов; 4 – стретчер; 6 – усилитель; 7 – компрессор; 8 – измерительное оборудование

Характеристики выходного излучения $\text{Yb}:\text{KYW}$ лазера

Таблица 1

Энергия импульса, нДж	Длительность импульса, фс	Частота следования импульсов, МГц	Средняя выходная мощность, Вт	M^2	Спектральная ширина импульса, нм	$\Delta\nu\Delta t$
>15	<150	70	>1	<1,1	>8	$\approx 0,32$

Автокорреляционная функция и спектр УКИ $\text{Yb}:\text{KYW}$ лазера представлены на рисунках 2 и 3 соответственно. Лазер обеспечивает близкие к спектрально-ограниченным импульсы ($\Delta\nu\Delta t \approx 0,32$).

Для снижения частоты следования импульсов перед усилением используется селектор импульсов на основе ячейки Поппельса на

кристалле ВВО, установленной по схеме четвертьволновой пластинки. Частота селектированных импульсов может изменяться от 1 до 10 кГц. Контраст селектора импульсов составил более 10^3 .

Для снижения пиковой мощности УКИ перед усилением использовался стретчер на основе дифракционных решеток, собранный по схе-

ме Мартинеса [4]. В схеме использовалась дифракционная решетка 1800 штр/мм. Габаритные размеры стретчера не превышали 200×100 мм² при коэффициенте растяжения около 10³. Расчетная длительность импульса определялась по выражению [5]:

$$\Delta \tau = - \left[\frac{4 (f - x) m^2 \lambda}{cd^2 \cos^2 \theta} \right] \Delta \lambda ,$$

где f – фокусное расстояние линзы, м; x – расстояние между линзой и решеткой, м; m – порядок дифракции; λ – длина волны, м; c – скорость света, м/с; d – период дифракционной решетки, м; θ – угол дифракции для центральной длины вол-

ны, рад; $\Delta \lambda$ – ширина спектра импульса на полувысоте, м.

Измеренная длительность импульса после стретчера составила 150 пс, что находится в хорошем согласовании с расчетным значением 155 пс. Автокорреляционная функция растянутого импульса представлена на рисунке 4.

На рисунке 5 представлена схема резонатора усилителя. В качестве активной среды использовался кристалл Yb:KGW толщиной 5 мм. Для продольной накачки активного элемента применялся лазерный InGaAs диод мощностью 25 Вт с волоконным выходом, диаметр волокна 100 мкм. Для получения максимального усиления реализовано до 65 проходов излучения по резонатору.

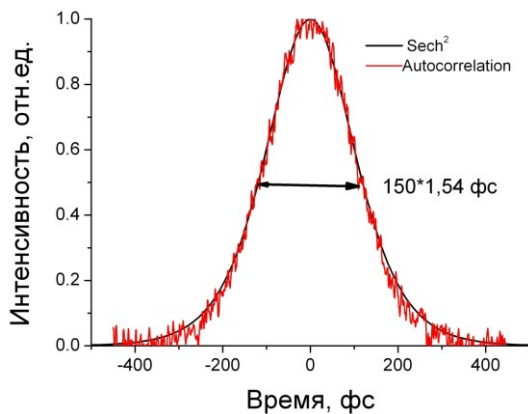


Рисунок 2 – Автокорреляционная функция усиливаемого импульса

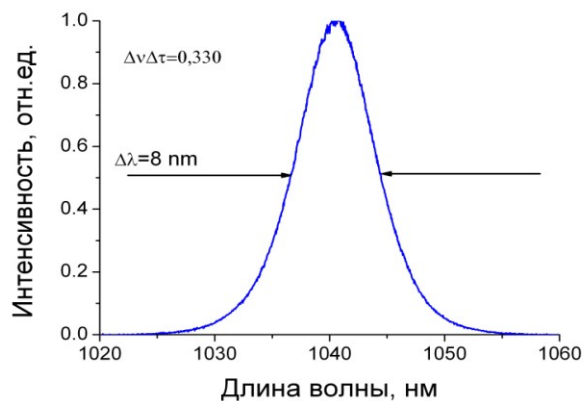


Рисунок 3 – Спектр усиливаемого импульса

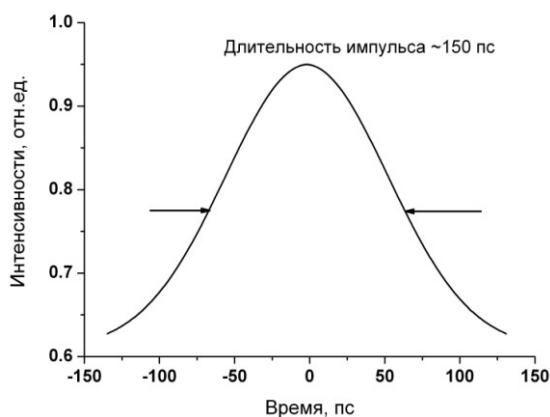


Рисунок 4 – Автокорреляционная функция растянутого импульса

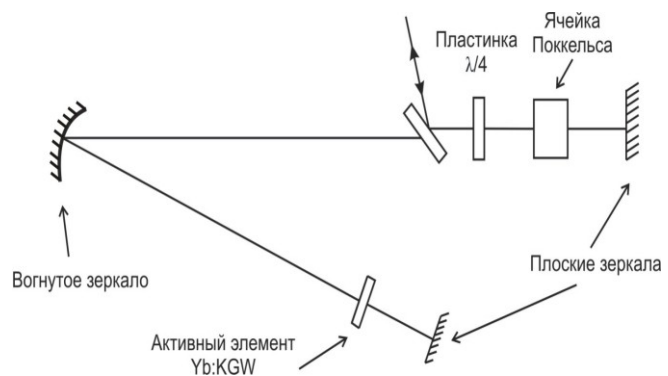


Рисунок 5 – Схема резонатора усилителя

Рисунок 6 демонстрирует изменение энергии усиливаемого импульса в резонаторе в зависимости от числа обходов по резонатору.

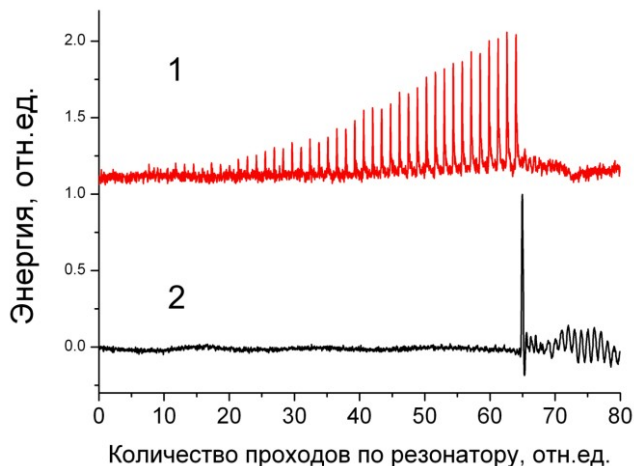


Рисунок 6 – Энергия импульса в резонаторе усилителя (1) и результирующий импульс на выходе усилителя (2)

После усиления лазерный импульс сжимался в компрессоре. Компрессор собран по схеме Мартинеса с двумя дифракционными решетками 1800 штр/мм. На рисунке 7 показана автокорреляционная функция усиленного импульса. Длительность сжатого импульса составила около 330 фс. Зависимость энергии импульса и средней выходной мощности от частоты следования показана на рисунке 8.

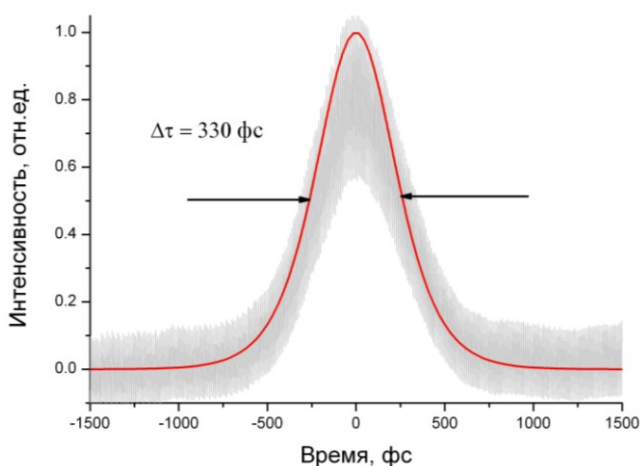


Рисунок 7 – Автокорреляционная функция усиленного импульса

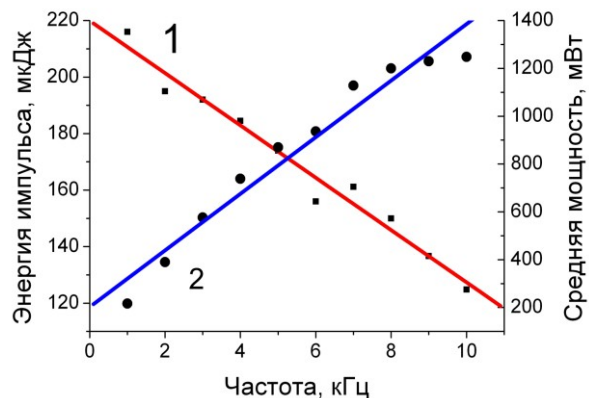


Рисунок 8 – Зависимость энергии импульса (1) и средней выходной мощности (2) от частоты следования

Средняя выходная мощность при частоте следования импульсов 10 кГц составила более 2 Вт. Пространственный профиль выходного излучения был близок к дифракционно-ограниченному с параметром качества $M^2 < 1,1$.

Заключение

Разработанная система усиления позволяет получать импульсы фемтосекундной длительности с энергией до 360 мкДж при частоте следования 1–10 кГц. При длительности импульса около 330 фс максимальная пиковая мощность достигала более 1 ГВт. Система может использоваться для спектроскопии быстропротекающих оптических процессов с высоким временным разрешением методом возбуждения-зондирования, а также для накачки оптических параметрических генераторов и усилителей света для получения фемтосекундных импульсов в ИК-области спектра.

Список использованных источников

1. Strickland, D. Compression of amplified chirped optical pulses / D. Strickland, G. Mourou // Opt. Comm. – 1985. – Vol. 56, № 3. – P. 219–221.
2. Delaigue, M. 300 kHz femtosecond Yb:KGW regenerative amplifier / M. Delaigue [et al.] // CLEO, Technical Digest. – 2006. – paper CWN3.
3. DeLoach, L.D. Evaluation of absorption and emission properties of Yb³⁺ doped crystals for laser applications / DeLoach L.D. [et al.] // IEEE Journal of Q. Electron. – 1993. – Vol. 29, № 4. – P. 1179–1191.

4. *Martínez, O.E.* Negative group-velocity dispersion using refraction / O.E. Martínez [et al.] // J. Opt. Soc. Am. A – 1984. – Vol. 10. – P. 1003.
5. *Ruiz de la Cruz, A.* Multi-pass confocal ultrashort pulse amplifier / A. Ruiz de la Cruz, R. Rangel-Rojo // Revista Mexicana de Física – 2005. – Vol. 51. – P. 488–493.

Rudnikov A.S., Kisel V.E., Gulevich A.E., Kuleshov N.V.

Diode pumped $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ regenerative amplification system of femtosecond laser pulses

The regenerative amplification system of femtosecond laser pulses, delivering a laser pulses with peak power more than 1 GW and duration <330 fs at repetition rates 1–10 kHz is presented. This system is applicable in pump-probe spectroscopy with high temporal resolution, as well as for pumping of optical parametric oscillators for generation of infrared femtosecond pulses. (E-mail: Alex_Electron@bk.ru)

Key words: regenerative amplifier, femtosecond pulses, diode pumping, chirped pulse amplification.

Поступила в редакцию 01.08.2012.