

# Фемтосекундный лазер на $\text{Cr}^{4+}$ : форстерите с накачкой волоконно-оптическим иттербиевым лазером и его шумовые характеристики

В.М.Гордиенко\*, А.А.Иванов\*\*, А.Н.Коновалов\*, А.А.Подшивалов\*,  
В.И.Прялкин\*, А.Б.Савельев\*

*Создан фемтосекундный  $\text{Cr}^{4+}$ -форстеритовый лазер, накачиваемый волоконным лазером типа PYL-10-LP, генерирующий непрерывную последовательность импульсов длительностью 45 фс с частотой повторений 110 МГц при выходной средней мощности 250 мВт. Исследован спектр шумов фемтосекундного лазера и твердотельных лазеров накачки.*

*Ключевые слова:* фемтосекундный лазер, твердотельные лазеры, шумовые характеристики.

## 1. Введение

Фемтосекундные лазерные технологии (ФЛТ) в настоящее время быстро внедряются в исследования по физике, химии, биологии и применяются в ряде технических приложений. Характерными примерами служат оптическая когерентная томография [1, 2], фемтосекундная метрология [3], нелинейная лазерная микроскопия [4] и т. д. Вопросы ФЛТ регулярно рассматриваются на конференциях [5] и недавно обсуждались на страницах журнала «Квантовая электроника» [6].

Динамика развития фемтосекундных технологий определяется техническими возможностями существующих фемтосекундных лазеров и их коммерческой доступностью. Наиболее широко используются лазеры на кристалле  $\text{Ti}:\text{сапфир}$ . Серийно выпускаемые фемтосекундные лазеры (фирмы Coherent и Spectra-Physics) позволяют получать импульсы длительностью менее 50 фс при средней выходной мощности около 1 Вт.

Перспективной активной средой для фемтосекундных лазеров является кристалл  $\text{Cr}^{4+}$ : форстерит ( $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) [7–11]. Ширина спектральной полосы флуоресценции  $\text{Cr}^{4+}$ : форстерита составляет 195 нм, что позволяет в принципе получать импульсы длительностью вплоть до 10 фс [8]. Возможности широкого применения фемтосекундных лазеров на  $\text{Cr}:\text{форстерите}$  обсуждались в [11]. Для их накачки используют, как правило, излучение с длинами волн в диапазоне 1000–1100 нм и поэтому применяют твердотельные лазеры на основе активных сред, легированных Nd (например,  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ ).

Использование волоконного иттербиевого лазера в качестве источника накачки кристалла  $\text{Cr}:\text{форстерита}$  [9] открывает новые перспективы, поскольку в последнее время достигнут заметный прогресс в создании этих лазеров. Волоконные лазеры компактны, имеют достаточно высокий коэффициент преобразования (свыше 60 %) и их выходная мощность превышает 10 Вт при ресурсе бо-

лее  $10^4$  ч [13]. К тому же оптоволоконный выход излучения и высокое качество пучка, а также стабильность данного лазера делают удобным и надежным сопряжение его излучения с резонатором фемтосекундного лазера.

Предметом настоящей работы является обсуждение мощностных, спектрально-временных и шумовых характеристик созданного нами на отечественной элементной базе фемтосекундного лазера на  $\text{Cr}:\text{форстерите}$  с контролем параметров в режиме реального времени [12].

## 2. Фемтосекундный лазер на $\text{Cr}^{4+}$ : форстерите

В наших исследованиях в качестве источника излучения накачки использовался волоконный лазер PYL-10-LP производства НТО «ИРЭ–Полнос» [13]. Выходная мощность этого лазера достигает 10.6 Вт при сохранении нулевой поперечной моды и линейной поляризации со степенью дискриминации более чем 50:1. Волоконный выход (длина световода 3 м) позволяет подводить коллимированное излучение (диаметр пучка 2.9 мм) непосредственно к линзе, фокусирующей излучение накачки в активный элемент, что значительно повышает стабильность генерации в фемтосекундном режиме.

Оптическая схема лазера на  $\text{Cr}:\text{форстерите}$  приведена на рис.1. Резонатор выполнен по классической Z-схеме. Активный элемент представляет собой кристалл  $\text{Cr}:\text{форстерита}$  длиной 19 мм с коэффициентом поглощения около  $1\text{ см}^{-1}$  на длине волны лазера накачки 1063 нм. Кристалл размещается в охлаждаемом с помощью элементов Пельтье моноблоке, температура которого регулируется микроконтроллером. Резонатор лазера образован зеркалами 3–6. Зеркало 7 используется для юстировки и получения генерации в непрерывном режиме. Пластина 10 отводит часть выходного излучения для измерения его параметров.

Для контроля параметров лазера нами была разработана автоматизированная система, которая включала в себя автокоррелятор для измерения длительности фемтосекундного импульса в диапазоне 30–200 фс, измеритель спектра лазерного излучения, обеспечивающий измерение в спектральной области 1200–1300 нм, изме-

\*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

\*\*Центр фотохимии РАН, Россия, 117421 Москва, ул. Новаторов, 7а

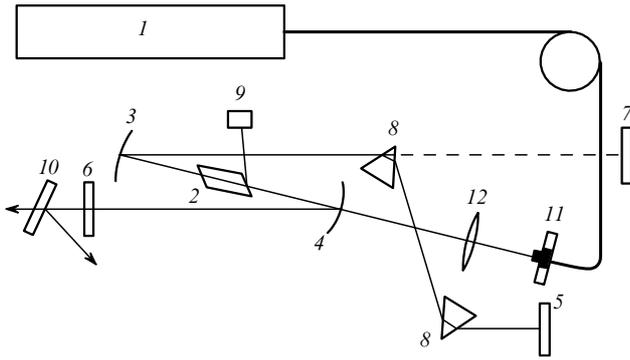


Рис.1. Схема лазера на Cr:форстерите: 1 – волоконный лазер накачки PYL-10-LP со световодным выходом; 2 – активный элемент; 3–6 – зеркала резонатора (в диапазоне 1200–1300 нм коэффициент отражения зеркал 3–5 составил 100 %, а зеркала 6 – 92 %, зеркало 4 является дихроичным (пропускание более 85 % на  $\lambda = 1063$  нм)); 7 – вспомогательное зеркало; 8 – призма; 9 – фотоприемник для регистрации средней мощности накачки; 10 – делительная пластина; 11 – держатель волоконного выхода лазера накачки; 12 – фокусирующая линза.

рителю средней мощности фемтосекундного лазерного излучения (1 мВт – 1 Вт) и мощности излучения накачки (1 – 10 Вт), а также устройство термоконтроля активного элемента Cr:форстеритового лазера.

Конструктивно система контроля параметров лазерного излучения Cr:форстеритового лазера собрана на независимой платформе и размещена на несущей плите лазера. Оптическая схема системы представлена на рис.2. Фазовая пластинка поворачивает плоскость поляризации падающего луча так, чтобы она составляла угол  $45^\circ$  с главными плоскостями кристаллов линии задержки. Зеркало 2 направляет 90 % излучения в измерительный тракт коррелятора, где оно проходит через кристалл постоянной линии задержки 6 и кристалл линии задержки 7 (размещенный на поворотном устройстве с приводом от шагового двигателя). Отразившись от зеркала 4, излучение проходит еще раз через оба кристалла линии задержки, поворачивается зеркалом 5 и линзой 8 фокусируется в кристалл DKDP 9 толщиной 200 мкм, вырезанный в направлении синхронизма генерации второй гармоники

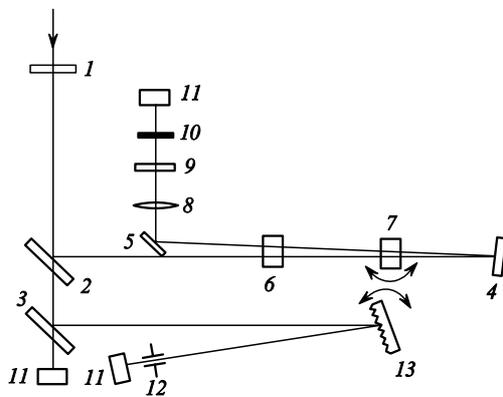


Рис.2. Оптическая схема коррелятора-спектрометра: 1 – фазовая пластинка; 2–5 – поворотные зеркала; 6 – неподвижный кристалл ПЛЗ; 7 – кристалл переменной ПЛЗ; 8 – фокусирующая линза; 9 – кристалл DKDP для генерации второй гармоники; 10 – фильтр; 11 – фотоприемники; 12 – диафрагма; 13 – дифракционная решетка.

II типа взаимодействия для излучения с  $\lambda = 1250$  нм. Энергия излучения второй гармоники измеряется фотоприемником 11, фильтр 10 отсекает основное излучение. Прошедшее через зеркало 2 излучение заводится зеркалом 3 на дифракционную решетку (600 штрих./мм), которая также размещена на поворотном устройстве. Прошедшее через зеркало 3 излучение измеряется фотоприемником 11, сигнал которого пропорционален средней мощности фемтосекундного излучения.

Поворот шагового двигателя обеспечивает одновременное вращение кристалла линии задержки и дифракционной решетки. Дифрагирующее на решетке излучение направляется на InGaAs-фотоприемник 11, перед которым расположена щель 12 шириной 100 мкм. Разрешение такого спектрометра при расстоянии между решеткой и щелью 30 см составляет 1 нм. Предварительная калибровка спектрометра осуществляется по линиям лазерного излучения накачки (1063 нм) и Cr:форстеритового лазера (1250 нм).

Принцип действия автокорреляционного измерителя длительности основан на измерении энергии излучения второй гармоники  $eo - e$ -типа взаимодействия при взаимной задержке двух реплик импульса основного излучения  $o$ - и  $e$ -поляризации [14]. Получаемая при этом кросс-корреляционная функция второго порядка однозначно определяет длительность импульса основного излучения при условии, что толщина кристалла ГВГ гораздо меньше групповой длины синхронного взаимодействия импульсов основного излучения и второй гармоники для II типа взаимодействия. Кристалл DKDP характеризуется минимальной дисперсией групповой скорости в диапазоне спектра 1230–1270 нм (двукратное дисперсионное расплывание импульса длительностью 50 фс происходит при длине кристалла более 5 см); минимальная групповая длина при генерации второй гармоники II типа (взаимодействие  $oe - e$ ) составляет 0.53 мм при длительности импульса 50 фс. Это означает, что при толщине кристалла 200 мкм таким автокоррелятором можно измерять длительность импульса до 20 фс.

Измеряемым параметром в рассматриваемом случае является средняя мощность излучения второй гармоники, генерируемой в кристалле ГВГ при наличии импульсов основной частоты  $o$ - и  $e$ -поляризации, которые предварительно разводятся по поляризациям и задерживаются относительно друг друга в двулучепреломляющем кристалле поляризационной линии задержки (ПЛЗ) – кристалле DKDP толщиной 5 мм, вырезанном в направлении  $\theta = 45^\circ$ . Для совмещения во времени фемтосекундных импульсов в кристалле ГВГ используется переменная поляризационная линия задержки (ППЛЗ), в качестве которой применяется аналогичный кристалл DKDP, сориентированный так, что его оптическая ось ортогональна оси кристалла ПЛЗ. При вращении кристалла ППЛЗ в главной оптической плоскости в небольшом диапазоне углов ( $45 \pm 10^\circ$ ) импульс  $e$ -поляризации после прохождения кристалла испытывает задержку от  $-150$  до  $+150$  фс относительно импульса  $o$ -поляризации.

Таким образом, сканируя кристалл ППЛЗ по углу шаговым двигателем и измеряя энергию импульса второй гармоники, можно измерить кросс-корреляционную функцию лазерного импульса. Вид этой функции зависит от взаимной ориентации поляризации падающего излучения и главной плоскости кристалла ГВГ. Если угол между плоскостью поляризации одного из падающих

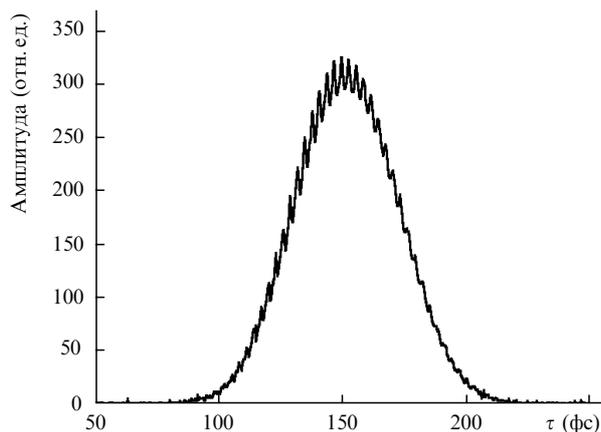


Рис.3. Корреляционная функция импульса фемтосекундного лазера на  $\text{Cr}$ : форстерите.

пучков и главной плоскостью равен нулю, то получается гладкая кросс-корреляционная функция без пьедестала. При  $45^\circ$ -ной ориентации функция имеет 100 %-ную модуляцию и пьедестал. Для промежуточной ориентации уровень пьедестала и глубина модуляции изменяются. На рис.3 приведен пример корреляционной функции для  $5^\circ$ -ной ориентации, период осцилляций на кривой соответствует изменению относительной задержки на 4.2 фс при длине волны генерации 1260 нм.

Сигналы с фотоприемников в каналах измерителя спектра, автокоррелятора и измерителей выходной мощности и мощности накачки оцифровываются и считываются микропроцессорным устройством, которое также управляет шаговым двигателем; число импульсов накопления в каждом положении последнего задается программно. При максимальной частоте работы шагового двигателя 5 кГц длительность одной выборки из 1000 точек (диапазон сканирования 1000 нм) без накопления занимает 0.2 с, при меньшем диапазоне сканирования вывод информации может осуществляться быстрее. Микропроцессор обеспечивает предварительную обработку сигналов и передачу данных в персональный компьютер через стандартный последовательный порт. Программное обеспечение, разработанное на основе пакета Lab View, позволяет проводить обработку данных и управление периферийными устройствами в реальном времени. На рис.5 приведено изображение на мониторе компьютера при работе системы регистрации.

Поскольку усиление в кристалле  $\text{Cr}$ : форстерита зависит от температуры, нами разработана система термостабилизации. Температура кристалла поддерживается с точностью  $\pm 0.1^\circ$  с помощью термоэлектрического элемента, горячий спай которого охлаждается потоком воды в контуре охлаждения. Достигавшиеся минимальные температуры активного элемента (при температуре охлаждающей жидкости  $13^\circ\text{C}$ ) составляли:  $-10^\circ\text{C}$  при мощности накачки 9 Вт и  $-20^\circ\text{C}$  при мощности 5 Вт. Температурная зависимость выходной мощности фемтосекундного излучения представлена на рис.4. Видно, что выходная мощность лазера на  $\text{Cr}$ : форстерите линейно растет с уменьшением температуры кристалла. Однако уменьшение температуры ниже точки «росы» требует обдува кристалла сухим азотом, поэтому в качестве рабочего был выбран диапазон температур  $5-7^\circ\text{C}$ . При таких условиях и накачке  $\sim 8$  Вт осаждения паров воды на поверхности кристалла не наблюдалось.

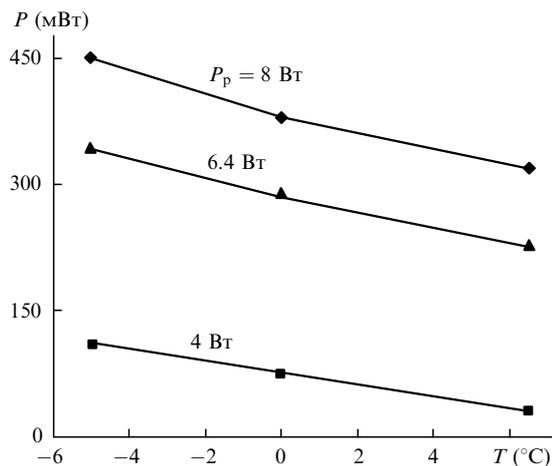


Рис.4. Температурная зависимость средней выходной мощности  $P$  фемтосекундного излучения при различных уровнях мощности накачки  $P_p$ .

В зависимости от настройки резонатора  $\text{Cr}$ : форстеритового лазера достигались различные выходные характеристики генерируемого излучения. При этом минимальная длительность импульсов составляла 45 фс при средней выходной мощности 250 мВт (частота повторения импульсов 110 МГц). При длительности генерируемых импульсов не более 70 фс выходная мощность увеличивалась до 380 мВт. Общий вид разработанного нами фемтосекундного лазера на  $\text{Cr}$ : форстерите представлен на рис.5.

### 3. Измерение шумовых характеристик

Одним из важных применений фемтосекундных лазеров являются прецизионные измерения с использованием техники гетеродинамирования [1, 2]. Однако потенциальные возможности таких измерений определяются не только длительностью импульса и выходной мощностью, но и стабильностью излучения. Нами проведен ряд экспериментов по исследованию амплитудных шумов разработанного лазера, а также лазера накачки. Для сравнительного анализа шумовые характеристики были измерены и для фемтосекундного лазера на  $\text{Cr}$ : форстерите с накачкой лазером Millennium-IR.

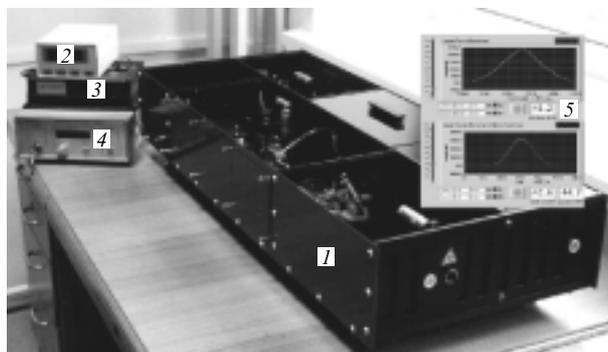


Рис.5. Общий вид фемтосекундного лазера на  $\text{Cr}^{4+}$ : форстерите: 1 – корпус лазера, содержащий резонатор и систему регистрации; 2 – система термостабилизации; 3 – излучатель волоконного лазера RYL-10-LP; 4 – блок питания лазера RYL-10-LP; 5 – изображение монитора системы регистрации с параметрами фемтосекундного излучения.

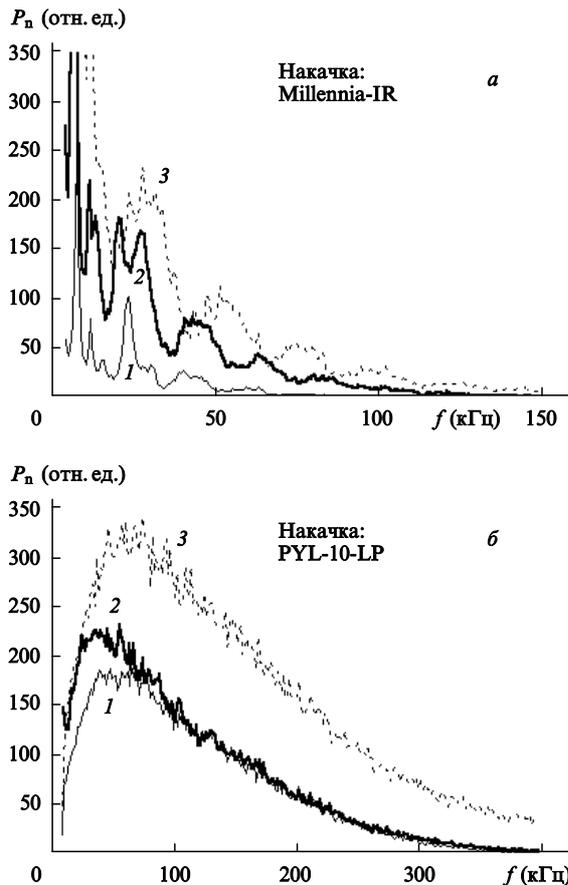


Рис.6. Спектры амплитудных шумов лазера на Cr: форстерите и лазеров накачки Millennia-IR (а) и PYL-10-LP (б); шумы лазера накачки (1), а также лазера на Cr: форстерите в режиме синхронизации мод (2) и в непрерывном режиме генерации (3).

При исследовании шумов излучение лазеров подавалось на фотоприемник, сигнал с которого поступал на осциллограф и спектроанализатор С4-74. С последним был сопряжен компьютер, позволявший записывать усредненные спектры шумов. При этом спектры шумов записывались как в непрерывном режиме генерации, так и в режиме синхронизации мод. Контроль глубины модуляции излучения осуществлялся с помощью осциллографа.

Средние значения глубины модуляции огибающей последовательности фемтосекундных импульсов для обоих случаев накачки фемтосекундных лазеров по порядку величины совпадали:  $0.075 \pm 0.025\%$  ( $\sim 7.5 \times 10^{-4}$ ) для лазера с накачкой от Millennia-IR и  $0.2 \pm 0.1\%$  ( $\sim 2 \times 10^{-3}$ ) для лазера с накачкой от PYL-10-LP. Спектральные характеристики амплитудных шумов сильно различались. На рис.6 показаны соответствующие усредненные спектры амплитудных шумов исследованных фемтосекундных лазеров и соответствующих лазеров накачки. Видно, что шумы лазера с накачкой от Millennia-IR локализованы в низкочастотной области (до 20–30 кГц), тогда как при накачке волоконным лазером PYL-10-LP шумы являются более широкополосными и сосредоточены в высокочастотной полосе (30–150 кГц).

Спектральная плотность шума фемтосекундного лазера, накачиваемого твердотельным лазером Millennia-IR, в диапазоне от нуля до 20 кГц примерно в 10 раз больше, чем лазера с волоконной накачкой. Однако на частотах, превышающих 150 кГц, ситуация становится об-

ратной: плотность шума при накачке лазером Millennia-IR становится на порядок и более меньше, чем при накачке волоконным лазером (рис.6).

Наши исследования также показали, что шумы накачки переходят в шумы генерации с некоторым коэффициентом преобразования. Отметим, что для обоих фемтосекундных лазеров наблюдалось увеличение амплитудных шумов при переходе в непрерывный режим генерации. Из этого следует, что при использовании фемтосекундных лазеров в гетеродинных измерительных системах следует ожидать уменьшения чувствительности при регистрации слабых сигналов по сравнению со стандартными гетеродинными измерителями на основе непрерывных источников, работающих со сдвигом частоты опорного излучения, когда рабочий диапазон частот выходит далеко за пределы амплитудных шумов лазера.

Уменьшение чувствительности измерителя в результате влияния лазерных шумов можно оценить, учитывая, что предельная чувствительность определяется дробовыми шумами фотоприемника

$$i_{sh}^2 = 2eIF,$$

где  $e$  – заряд электрона;  $I = \eta eP/h\nu$  – фототок, выделяющийся на фотоприемнике;  $F$  – частотная полоса шумов;  $P$  – падающая на фотоприемник мощность опорного излучения гетеродина;  $h\nu$  – энергия кванта регистрируемого излучения;  $\eta$  – квантовая эффективность детектора. Тогда отношение шумов  $i_L^2$ , вызванных амплитудными шумами лазера, к дробовым шумам  $i_{sh}^2$  будет определяться следующим образом:

$$\frac{i_L^2}{i_{sh}^2} = \frac{\eta P_0 M^2}{2h\nu F_L},$$

где  $M$  – среднее значение глубины модуляции в полосе частот  $F_L$ ;  $P_0$  – мощность опорного излучения, при которой дробовые шумы превышают шумы электронной аппаратуры (тепловые).

Для оценки возьмем  $M = 0.001$ ,  $P_0 \approx 300$  мкВт,  $\nu = 2.4 \times 10^{14}$  Гц,  $F_L \sim 100$  кГц,  $\eta = 0.3$ . Тогда получим, что шумы, обусловленные амплитудными флуктуациями лазерного излучения, в  $3 \times 10^3$  раз превышают дробовые шумы, т.е. при использовании такого лазера чувствительность (отношение сигнал/шум) уменьшится на 3 порядка. Данная оценка приведена в предположении, что спектральная плотность шумов распределена равномерно в полосе 100 кГц. Если же использовать лазер на Cr: форстерите с накачкой излучением лазера PYL-10-LP, то, как следует из рис.6, выбором соответствующего диапазона частот можно значительно повысить отношение сигнал/шум. Так, в низкочастотной области (до 10 кГц) чувствительность увеличится в 10 раз по сравнению с приведенной выше оценкой. А для частот гетеродинирования, превышающих полосу шумов лазера, чувствительность системы приближается к чувствительности, соответствующей режиму ограничения дробовыми шумами.

Вместе с тем использование в схемах прецизионных гетеродинных измерителей Cr: форстеритового лазера, накачиваемого волоконным лазером, представляется перспективным по следующим обстоятельствам. Во-пер-

вых, спектральные характеристики амплитудных шумов лазера с волоконной накачкой делают его более перспективным при решении задач оптической когерентной томографии, для которых рабочим диапазоном является низкочастотная область. Во-вторых, длительности импульса 50 фс соответствует пространственное разрешение  $\sim 15$  мкм, что практически важно для локальных доплеровских измерений скоростей потоков в биологических рассеивающих системах, для изучения локальных флуктуаций плотности и показателя преломления в жидкостях и др. Наконец, частотный сдвиг сигнала в область гетеродинамирования вне полосы шумов с помощью акустооптического модулятора позволит обойти проблему шумов и даст возможность определять знак скорости.

#### 4. Заключение

Нами разработан и изготовлен фемтосекундный лазер на кристалле  $\text{Cr}^{4+}$ : форстерит с накачкой волоконным лазером PUL-10-LP и автоматизированной системой контроля параметров лазерного излучения, созданными на отечественной элементной базе. Исследован спектр амплитудных шумов фемтосекундного лазера и обсуждены возможности его использования в гетеродинамических прецизионных измерителях динамических характеристик рассеивающих объектов.

Отметим, что применение эффективных нелинейно-оптических удвоителей частоты для фемтосекундных лазеров на  $\text{Cr}$ : форстерите [15] позволит при необходимости создавать измерительные схемы и в видимом диапазоне длин волн. Особенно заманчивой с точки зрения перспективных фемтосекундных технологий, например в

микрохирургии глаза, может быть сочетание схемы «cavity dumper» [16], позволяющей более чем на порядок увеличить энергию одиночного фемтосекундного импульса при сохранении генерируемой средней мощности, с техникой оптического гетеродинамирования, используемой для прецизионного мониторинга оперируемой зоны.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 00-02-17269 и № 02-02-17238-а.

1. Brezinski M., Fujimoto J. *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.*, **5**, 1185 (1999).
2. Гордиенко В.М., Коновалов А.Н., Магницкий С.А., Турсьнов Ж.С. *Квантовая электроника*, **31**, 83 (2001).
3. Bagayev S.N., Dmitriyev A.K., Chepurov S.V., et al. *Laser Phys.*, **11**, 1270 (2001).
4. Hell S., Bahlmann K., Shreder M., et al. *J. Biomed. Opt.*, **1**, № 1, 71 (1996).
5. *Proc. I–VIII Intern. Workshops Femtosecond Technology FST* (1994–2001, Tsukuba, Japan).
6. Багаев С.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 377 (2001).
7. Seas A., Petricevic V., Alfano R. *Opt. Lett.*, **17**, 937 (1992).
8. Zhang Zh., Torizuka K., Itatani T., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 1975 (1997).
9. Liu X., Qian L., Wise F. *Opt. Lett.*, **23**, 129 (1998).
10. Ivanov A.A., Alfimov M.V., Zheltikov A.M. *Laser Phys.*, **10**, 796 (2000).
11. Гордиенко В.М. *Препринт МГУ им. № 13* (М., 2000).
12. Gordienko V.M., Grechin S.S., Podshivalov A.A., Pryalkin V.I., Ivanov A.A. *Digest ICONO'2001* (SS3).
13. <http://www.ire-polusgroup.com/>
14. Тулин И.В. Патент РФ № 2057304 от 18.05.94.
15. Гордиенко В.М., Иванов А.А., Подшивалов А.А., Прялкин В.И., *Квантовая электроника*, **31**, 341 (2001).
16. Slobodchikov E., Ma J., Kamalov V., Tominaga K., Yoshihara K. *Opt. Lett.*, **21**, 354 (1996).