

# Титан-сапфировый лазерный генератор, синхронизованный по частоте следования импульсов с лазером накачки за счет нелинейного взаимодействия импульсов накачки и генерации в кристалле активной среды

Н.В.Диденко, А.В.Конященко, Д.А.Конященко, П.В.Кострюков,  
И.И.Курицын, А.П.Луценко, А.О.Маврицкий

*Разработана фемтосекундная лазерная система с синхронизацией двух твердотельных генераторов при синхронной накачке одного генератора другим. Время поддержания синхронизации без использования дополнительной электроники превышало 6 ч, а относительная временная нестабильность при этом составляла не более 1 фс. Предложена модель взаимодействия излучения импульсов накачки и генерации в кристалле активной среды за счет перекрестной фазовой модуляции на нелинейности третьего порядка, качественно описывающая механизм синхронизации. В рамках данной модели рассмотрено влияние расстройки длин резонаторов на параметры излучения синхронно накачиваемого титан-сапфирового лазера.*

**Ключевые слова:** синхронная накачка, фемтосекундная накачка, титан-сапфировый лазер, перекрестная фазовая модуляция.

## 1. Введение

Фемтосекундные лазерные системы на кристаллах сапфира, легированного ионами титана, получили широкое распространение в качестве основного инструмента исследований для ряда направлений. Большое внимание в связи с этим уделяется синхронизации и управлению относительной временной задержкой между импульсами излучения лазеров данного класса и других оптических источников. Существует несколько подходов к решению этих задач: использование общей для двух лазерных резонаторов активной среды или иного нелинейного элемента [1–3], оптических схем с модуляцией потерь в резонаторе одного лазерного источника излучением другого [4], электронных схем обратной связи [5–7], а также метода синхронной накачки.

Метод синхронной накачки широко применялся для лазерных генераторов на основе растворов красителей, позволяя уменьшить длительность излучаемых этими источниками импульсов [8, 9]. Предпринимались отдельные попытки использования данного метода и для лазерных генераторов других типов [10, 11], в том числе титан-сапфировых [12–16]. В последнем случае накачка проводилась импульсами пикосекундной длительности, что обеспечивало автоматический запуск режима синхронизации мод накачиваемого лазера. Такой подход также рассматривался как альтернатива непрерывной накачке

кристалла титан-сапфира газовыми (аргоновыми ионными) и твердотельными лазерами, генерирующими излучения в зеленой области спектра. Возможность синхронной накачки лазеров на титан-сапфире импульсами длительностью порядка ста фемтосекунд до сих пор оставалась без должного внимания, несмотря на дополнительные преимущества, которые предоставляет указанный метод.

Сегодня актуальность синхронной накачки титан-сапфировой активной среды связана с появлением мощных импульсных твердотельных ИК лазеров [17, 18], генерирующих импульсы субпикосекундной длительности. При средней мощности такого источника 7–8 Вт возможно преобразование 60% энергии его излучения во вторую гармонику, что достаточно для получения мощности не менее 0.5 Вт на выходе титан-сапфирового лазера.

Фемтосекундная синхронная накачка имеет следующие преимущества по сравнению с накачкой непрерывным излучением:

- Автоматический запуск режима синхронизации мод титан-сапфирового лазера без использования насыщающегося поглотителя или дополнительного стартерного устройства.

- Уменьшение стоимости лазера накачки вследствие упрощения его схемы, обусловленного высокой эффективностью преобразования импульсного излучения во вторую гармонику, т.е. отсутствие необходимости внутрирезонаторного удвоения частоты в лазере накачки.

При отстройке частот цугов импульсов накачки и титан-сапфирового лазера свыше 100 Гц параметры излучения титан-сапфирового лазера были такими же, как и при накачке непрерывным лазером. Глубина модуляции выходной мощности титан-сапфирового лазера на разностной частоте цугов импульсов накачки и генерации составляет не более 0.1% [12].

По сравнению с накачкой пикосекундными импульсами накачка импульсами фемтосекундной длительности

Н.В.Диденко, А.В.Конященко, П.В.Кострюков, А.П.Луценко. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: abrown@yandex.ru  
Д.А.Конященко, И.И.Курицын, А.О.Маврицкий. ООО «Авеста», Россия, 108840 Москва, Троицк, ул. Физическая, 11; e-mail: eli@avesta.ru

Поступила в редакцию 3 ноября 2016 г.

позволяет добиться автоматического захвата и удержания (в пределах миллигерц) титан-сапфировым лазером частоты следования импульсов накачки при достаточно малой (~1 мкм) расстройке длин их резонаторов.

Синхронизация лазеров обусловлена нелинейным взаимодействием коротких импульсов накачки, имеющих высокую пиковую мощность, с импульсами генерации, усиливаемыми в активной среде. В кристаллах, работающих по принципу керровской линзы, может происходить эффективная перекрестная фазовая модуляция (ПФМ) распространяющихся попутно импульсов генерации и достаточно мощных и коротких импульсов накачки. Модуляция фазы импульса генерации под действием импульсов накачки вызывает эффективное временное «притягивание» импульсов генерации к импульсам накачки при наличии отрицательной суммарной дисперсии резонатора [19–21]. Такой эффект, как показывает простой качественный анализ, имеет место вследствие изменения спектрального состава излучения генерации, происходящего из-за несимметричного уширения спектра импульсов генерации благодаря ПФМ.

В настоящей работе описана синхронизация двух твердотельных фемтосекундных лазеров путем ПФМ при синхронной накачке одного лазера другим и предложена качественная модель механизма синхронизации. Приведено краткое описание экспериментальной системы, реализующей указанный метод для получения синхронизованных между собой по частоте и фазе цугов лазерных импульсов.

## 2. Механизм синхронизации при синхронной накачке

Механизм синхронизации титан-сапфирового лазера и лазера накачки можно качественно описать в приближении плоских волн при попутном распространении импульсов накачки и генерации:

$$\frac{\partial A_g}{\partial z} + k_1(\omega_g) \frac{\partial A_g}{\partial t} + \frac{ik_2(\omega_g)}{2} \frac{\partial^2 A_g}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A_g = i\gamma_g |A_g|^2 A_g + 2i\gamma_g |A_p|^2 A_g, \tag{1}$$

где  $A_g$  – медленно меняющаяся амплитуда генерируемого поля на частоте  $\omega_g$ , нормированная таким образом, чтобы величина  $|A_g|^2$  равнялась мгновенной мощности оптического излучения на данной частоте;  $A_p$  – аналогичная величина, характеризующая заданное поле накачки;  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты разложения в ряд волнового числа  $k(\omega)$  вблизи частоты  $\omega_g$ ;  $\alpha$  – коэффициент нерезонансного поглощения среды;  $\gamma_g$  – коэффициент нелинейности, зависящий от эффективной площади мод поля  $A_p$  или  $A_g$  (поперечные распределения которых в кристалле практически совпадают).

В уравнении (1) первое слагаемое в правой части учитывает самовоздействие излучения генерации, в частности фазовую самомодуляцию (ФСМ) на нелинейном показателе преломления. Второе слагаемое отвечает за ПФМ.

Отметим, что это уравнение применимо только при большом количестве допущений. В дальнейшем мы не учитываем дисперсионное расплывание импульсов в кристалле, т. к. как для наших экспериментальных условий дисперсионная длина (~20 см) для каждого из них много

больше длины кристалла. Пренебрегая нерезонансным поглощением излучения генерации (членом  $(\alpha/2)A_g$  в выражении (1)), для поправки к мгновенной частоте поля генерации, обусловленной воздействием накачки, получаем выражение

$$\delta\omega_{\text{СРМ}} = -2\gamma_g \frac{\partial |A_p|^2}{\partial t} z = -\frac{n_2 \omega_g}{c} \frac{\partial I_p}{\partial t} z, \tag{2}$$

где  $I_p$  – интенсивность поля накачки;  $n_2$  – нелинейный показатель преломления. При взаимодействии импульсов накачки и генерации в кристалле титан-сапфира фазовая скорость излучения генерации локально уменьшается пропорционально интенсивности поля накачки, что приводит к изменению длительности импульса генерации и его средней оптической частоты. Если импульс генерации опережает импульс накачки (находится в области  $\eta \leq 0$  в системе координат, бегущей с групповой скоростью импульса генерации; рис.1), его задний фронт отстает от переднего. Импульс растягивается, приобретает отрицательный чирп, а его несущая частота уменьшается. Если импульс генерации отстает от импульса накачки, он также приобретает отрицательный чирп, однако при этом сжимается, и несущая частота импульса растет при его распространении в кристалле.

Вследствие сдвига несущей частоты импульса генерации согласно (2) в первом приближении теории дисперсии его групповая скорость будет изменяться, что приведет к изменению времени обхода этим импульсом резонатора длиной  $l$ . При условии, что суммарная дисперсия резонатора за обход является отрицательной:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_g} = -\frac{u^2}{l} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \omega^2} > 0,$$

изменение средней групповой скорости  $u$  импульса генерации

$$\Delta u = -\frac{n_2 \omega_g}{c} z \frac{dI_p}{dt} \left. \frac{\partial u}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_g}. \tag{3}$$

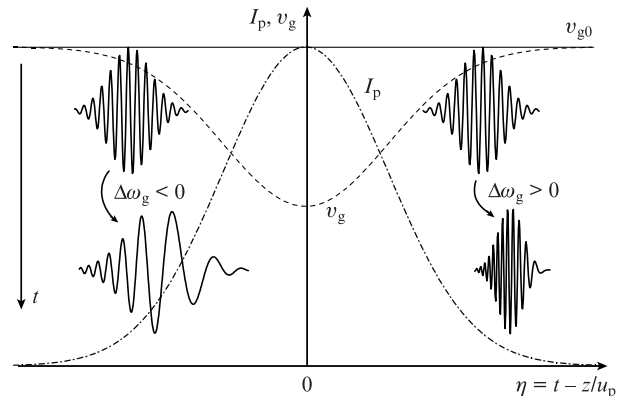


Рис.1. Изменение длительности и частоты ( $\Delta\omega_g$ ) импульса генерации в кристалле титан-сапфира под действием поля накачки. Штрих-пунктирная кривая – огибающая импульса накачки по интенсивности в бегущей с ним с групповой скоростью  $u_p$  системе координат. Штриховая кривая – локальная фазовая скорость излучения генерации  $v_g = v_{g0} + \Delta v_g(I_p)$ . Вертикальная стрелка – направление эволюции импульса генерации во времени. Иллюстрация эволюции импульсов не учитывает разность групповых скоростей импульсов накачки и генерации в кристалле и их поглощение.

Из (3) следует, что если импульс генерации запаздывает относительно импульса накачки и «видит» его ниспадающий фронт, т. е.  $\partial I_p / \partial \eta < 0$ , то центральная длина волны генерации уменьшается и, следовательно, групповая скорость распространения его в резонаторе растет. Поэтому на следующем обходе резонатора импульс генерации уже меньше отстает от импульса накачки, т. е. за несколько аксиальных периодов реализуется эффективное притяжение между импульсами. Если импульс генерации опережает импульс накачки, описанный механизм действует в противоположном направлении, что в итоге приводит к эффективной стабилизации временной задержки между пиками импульсов [20].

### 3. Описание эксперимента

Рассмотренный выше эффект стабилизации задержки между импульсами титан-сапфирового лазера и его накачки наблюдался экспериментально, так же как и сопутствующее смещение несущей частоты генерации, возникающее как реакция системы на изменение разности частот следования этих импульсов. Для проведения эксперимента был создан прототип системы, состоящей из двух лазерных генераторов, которые установлены на общую оптическую плиту с водяным охлаждением и защищены от внешних воздействий общим корпусом. В системе использовался иттербиевый твердотельный ИК лазер ТеМа-1050 (Авеста-Проект) вместе с генератором второй оптической гармоники мощностью до 4.2 Вт на длине волны 525 нм при длительности импульса 170 фс и частоте следования импульсов в цуге, равной 70 МГц. Это излучение после поворота его плоскости поляризации и фокусировки линзой в кристалл активной среды использовалось для накачки титан-сапфирового лазера (рис.2). Прошедшее через удвоитель излучение иттербиевого лазера отделялось от второй гармоники зеркалом 31 и направлялось в схему регистрации задержки между импульсами двух лазерных цугов (она расположена правее выходного окна ВО лазера на титан-сапфире на рис.2).

Синхронно накачиваемый лазер имел асимметричный Z-образный резонатор с кристаллом титан-сапфира и призмным компрессором. Титан-сапфировый лазер излучал импульсы на центральной длине волны 800 нм длительностью 25–60 фс в зависимости от его конфигурации и настройки. Средняя выходная мощность накачиваемого излучателя составляла 300 мВт при частоте следования импульсов 70 МГц. В компрессорном плече резонатора находилось подвижное зеркало ГЗ (рис.2), установленное на пьезоэлектрический шаговый двигатель.

Перемещение подвижного зеркала приводило к изменению длины резонатора титан-сапфирового лазера, позволяло изменять частоту следования его импульсов в широких пределах (~1 МГц) и управлять отстройкой этой частоты от частоты следования импульсов накачки. Путем ступенчатой автоматической коррекции положения подвижного зеркала ГЗ поддерживалась оптимальная длина резонатора титан-сапфирового лазера, обеспечивающая непрерывную синхронизацию его с лазером накачки. Сигналом ошибки служил сдвиг центральной длины волны генерации титан-сапфирового лазера по отношению к длине волны в режиме асинхронной или непрерывной накачки. Текущая центральная длина волны вычислялась в режиме реального времени из показаний интегрированного в систему спектрометра. С помощью подбора чувствительности системы обратной связи к величине спектрального сдвига достигались компенсация медленного дрейфа длины резонатора титан-сапфирового лазера и, как следствие, его точная синхронизация с лазером накачки в течение длительного времени.

Для определения точности синхронизации двух лазеров применялась кросс-корреляционная схема генерации суммарной частоты (рис.2) [22]. При использовании данной схемы измерялась задержка между цугами импульсов лазера накачки и излучателя на титан-сапфире. Из-за особенностей оптической схемы временные флуктуации измерялись между импульсом лазера накачки и ближайшим, следующим за ним импульсом титан-сапфирового генератора. Изменение задержки между ними с помощью

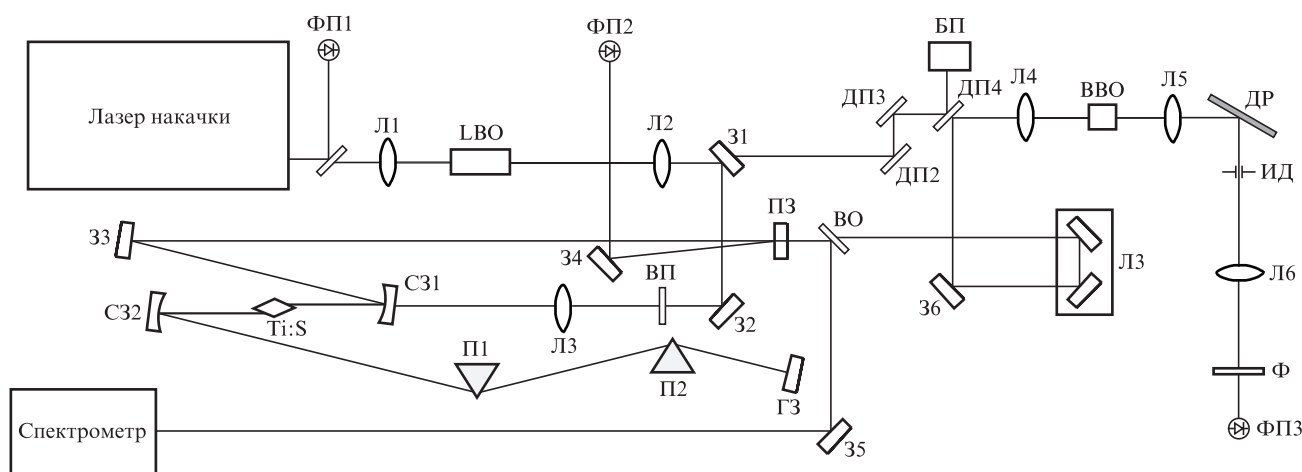


Рис.2. Оптическая схема системы генераторов с синхронной накачкой и схема эксперимента по измерению временных флуктуаций между импульсами этих генераторов:

ДП1 – ДП4 – делители пучка на длину волны 1050 нм; Л1 – Л6 – фокусирующие линзы; БП – блокиратор пучка; 31 и 32 – диэлектрические зеркала на длину волны 525 нм; ВП – вращатель поляризации; С31 и С32 – сферические зеркала; Тi:S – кристалл сапфира, легированный титаном; П1 и П2 – призмы компрессора; ГЗ – глухое зеркало с диэлектрическим покрытием; 33 – 36 – диэлектрические зеркала на длину волны 800 нм; ПЗ – полупрозрачное зеркало; ВО – выходное окно титан-сапфирового лазера; ФП1 – ФП3 – фотоприемники на основе рpп-фотодиодов; ЛЗ – моторизованная линия задержки; LBO – нелинейный кристалл трибората лития; ВВО – нелинейный кристалл бетабората бария; ДР – дифракционная решетка 1800 штр./мм; ИД – ирисовая диафрагма; Ф – фильтр марки СЗС.

линии задержки ЛЗ позволяет измерить корреляционную функцию импульсов, по ширине которой можно оценить величину временной нестабильности между цугами [23]. При условии, что импульсы обоих лазеров приходят на детектор (кристалл генератора суммарной частоты) с задержкой, соответствующей перекрытию их огибающих примерно на уровне половины амплитуды, сигнал на суммарной частоте пропорционален задержке между импульсами [2].

## 4. Результаты и их обсуждение

### 4.1. Эксперимент по синхронной накачке

Режим работы титан-сапфирового лазера при его накачке импульсами фемтосекундной длительности с частотой следования, отстоящей от частоты следования импульсов титан-сапфирового лазера на несколько сотен герц или более, с точки зрения возбуждения активной среды ничем принципиально не отличается от режима накачки непрерывным лазером, генерирующем излучение в зеленой области спектра. Данный вывод подтверждается близостью значений таких характеристик, как средняя мощность, длительность импульса и спектр излучения титан-сапфирового лазера, измеряемых в случаях его непрерывной и импульсной накачки. Наблюдение с помощью осциллографа огибающей непрерывного цуга импульсов синхронно накачиваемого титан-сапфирового лазера не выявляет заметной амплитудной модуляции при условии, что расстройка длин резонаторов достаточно велика. Нечувствительность амплитуды импульсов титан-сапфирового лазера к импульсному характеру накачки связана с большим, по сравнению с периодом следования импульсов накачки, временем релаксации верхнего лазерного уровня. Такая нечувствительность наблюдается при накачке титан-сапфирового лазера импульсами как фемтосекундной, так и пикосекундной длительности [12, 16].

На рис.3 показана измеренная зависимость разности частот следования импульсов титан-сапфирового лазера ( $f_2$ ) и импульсов накачки ( $f_1$ ) от разности длин резонаторов  $\Delta x = l_2 - l_1$  ( $l_1$  и  $l_2$  – длины резонаторов лазера накачки и титан-сапфирового лазера соответственно). На рис.3 можно выделить три области: первая – область синхронизации с захватом частоты, расположенная в интервале  $\Delta x = -0.5 \div 1.0$  мкм, вторая – область поддержания синхронизации без захвата частоты, занимающая интервал  $\Delta x = -4.2 \div 4.8$  мкм за вычетом первой области, и, вне двух упомянутых, третья – область амплитудно-модулированной непрерывной генерации.

Автоматический запуск фемтосекундного режима генерации (автозапуск) с одновременной автоматической подтяжкой частоты следования импульсов к частоте следования импульсов накачки  $f_1$  происходит в титан-сапфировом генераторе, длина резонатора которого соответствует первой области. При вынужденном срыве фемтосекундной генерации после краткого интенсивного воздействия на лазер каких-либо возмущающих факторов осуществляется автоматическое восстановление генерации (автозапуск) при  $f_1 = f_2$  (захват частоты). Изменения длины резонатора титан-сапфирового лазера в пределах первой области сопровождаются сдвигом центральной длины волны спектра генерации, компенсирующим расстройку  $\Delta x$ , так что точная привязка  $f_2$  к  $f_1$  постоянно со-

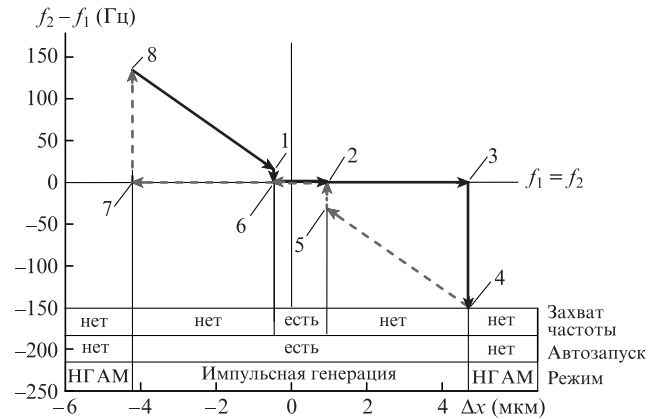


Рис.3. Отстройка частоты следования импульсов  $f_2$  титан-сапфирового лазера от частоты следования импульсов накачки  $f_1$  в зависимости от разности длин резонаторов при движении в сторону удлинения (сплошные стрелки) и укорочения (штриховые стрелки) резонатора. НГ АМ – режим непрерывной генерации титан-сапфирового лазера, характеризующийся наличием амплитудной модуляции с частотой  $f_1$ .

храняется. В нашем эксперименте, как и в более ранней работе [24], наблюдалось линейное взаимно однозначное соответствие между сдвигом центральной волны генерации титан-сапфирового лазера и изменением длины его резонатора (рис.4). Знак наклона прямой свидетельствует о наличии в резонаторе лазера именно отрицательной суммарной дисперсии, что согласуется с нашей качественной моделью: при увеличении длины резонатора титан-сапфирового лазера компенсирующее смещение спектра его генерации происходит именно в синюю сторону, т.к. групповая скорость импульса генерации при этом возрастает (см. также [18]).

Во второй области наблюдается автоматический запуск фемтосекундного режима титан-сапфирового генератора, т.е. режим фемтосекундной генерации, нарушенный в результате временного возмущения резонатора титан-сапфирового лазера, восстанавливается. Захват частоты следования импульсов  $f_2$  (ее подтяжка к частоте  $f_1$ ) после нарушения режима генерации самостоятельно не

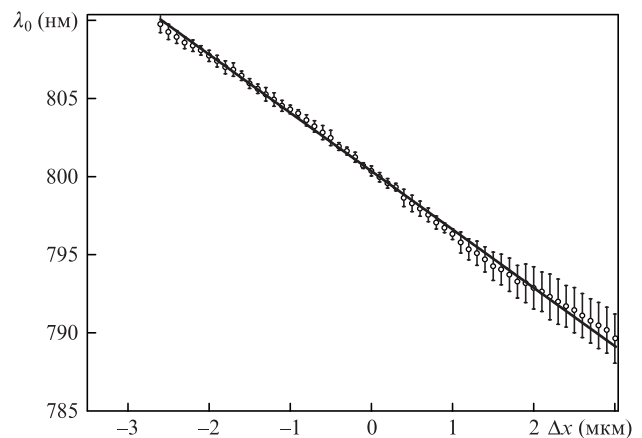


Рис.4. Зависимость центральной длины волны  $\lambda_0$  спектра излучения титан-сапфирового лазера от длины его резонатора в режиме непрерывной синхронизации с лазером накачки (точки). Сплошная линия – аппроксимация зависимости линейной функцией  $y = a + bx$ , где  $a = 800.34 \pm 0.03$ ,  $b = -3.73 \pm 0.02$ . Отклонения от прямой линии вызваны периодическим изменением температуры оптической плиты, на которой собрана лазерная система.



происходит, а зависимость  $f_2(\Delta x)$  переходит в линию с наклоном, соответствующим режиму непрерывной накачки титан-сапфирового генератора. При выходе из первой области во вторую без нарушения режима непрерывной фемтосекундной генерации устойчивая привязка частот ( $f_1 = f_2$ ) сохраняется. Таким образом, во второй области в зависимости  $f_2 - f_1$  от  $\Delta x$  наблюдается гистерезис, который выражается в одновременном наличии двух стабильных состояний для фиксированного значения  $\Delta x$ , реализующихся в зависимости от способа перехода из первой области во вторую.

Аналогичный эффект затягивания имеет место при автозапуске фемтосекундной генерации в третьей области. При выходе за границы второй области без срыва текущего режима титан-сапфировый генератор продолжает работать в импульсном режиме за счет керровской нелинейности кристалла активной среды, в то время как нелинейное взаимодействие между импульсами генерации и накачки в кристалле прекращается из-за их временного рассогласования. Такой режим работы титан-сапфирового генератора подобен режиму непрерывной накачки, при этом отсутствует какое-либо влияние величины расстройки  $\Delta x$  на параметры излучения. При выходе в третью область со срывом импульсной генерации титан-сапфирового лазера ее автоматическое восстановление не происходит. Излучение лазера в таком случае является непрерывным и имеет модуляцию по амплитуде на частоте  $f_2$ , причем глубина модуляции тем больше, чем меньше  $\Delta x$ .

Из рис.3 видно, что захват частоты при удлинении резонатора титан-сапфирового лазера происходит самопроизвольно при положительной отстройке частот  $f_2 - f_1 \approx 20$  Гц (точка 1 на рис.3, определяющая левую границу первой области). При дальнейшем удлинении резонатора (росте  $\Delta x$ ) привязка частоты  $f_2$  к  $f_1$  сохраняется до правой границы первой области (точка 2) и далее – вплоть до точки 3, являющейся правой границей второй области. В точке 3 наблюдается вынужденный срыв синхронизации (переход в точку 4) из-за достижения  $\Delta x$  критического значения. При обратном движении захват частоты (точка 5) происходит при  $\Delta x$ , близком по модулю к значению расстройки для прямого движения. Таким образом, точки 1 и 5 определяют границы первой области (области захвата частоты) –  $(\Delta x_1, \Delta x_5)$ . Гистерезис, аналогичный таковому при удлинении резонатора, наблюдается на отрезке между точками 6 и 7 вплоть до срыва синхронизации в точке 8, наступающего для критического значения отстройки при укорочении резонатора. Область автозапуска (вторая область) имеет характерный размер порядка десятков микрометров, в нашем случае – от 8 до 50 мкм в зависимости от длины использованного кристалла титан-сапфира и настройки резонатора синхронно накачиваемого лазера. Из рис.3 видно, что общая картина режимов работы лазера может быть асимметричной по отношению к критическим значениям  $\Delta x$ . Отметим, что указанная асимметричность очень сильно зависит от юстировки резонатора титан-сапфирового лазера.

Нами выделены два фактора, определяющие диапазон допустимых расстроек  $\Delta x_5 + \Delta x_1$ , в пределах которого наблюдается захват частоты  $f_1$ : с одной стороны – степень пространственного перекрытия каустик пучков накачки и генерации в кристалле активной среды титан-сапфирового лазера, с другой – суммарная дисперсия групповых скоростей в его резонаторе. Степень перекры-

тия каустик в кристалле активной среды влияет как на эффективность механизма керровской линзы, так и на степень проявления эффекта ПФМ, вследствие которого наблюдается синхронизация частот следования импульсов титан-сапфирового лазера и его накачки. Введение жесткой апертуры в резонатор титан-сапфирового лазера не только изменяет динамику формирования импульса, делая режим пассивной синхронизации мод в этом лазере более устойчивым, но также и значительно понижает эффективность перекрестной модуляции, ответственной за эффект синхронизации импульсов титан-сапфирового лазера и его накачки.

Согласование каустик пучков накачки и генерации в кристалле титан-сапфира позволяет при сохранении прочих условий изменять длину области синхронизации, т. е. величину  $\Delta x_5 - \Delta x_1$ , которая определяет стабильность синхронизации по отношению к факторам внешней среды. Возможны варианты настройки резонатора титан-сапфирового лазера, при которых максимальное изменение длины волны, возникающее в ответ на увеличение по модулю величины  $\Delta x$ , составляет всего 3–4 нм либо 40–45 нм. В последнем случае при сохранении благоприятных внешних условий (особенно при постоянстве температуры окружающей среды) синхронизация непрерывно поддерживается на протяжении шести и более часов.

Вторым важным параметром, влияющим на величину  $\Delta x_5 - \Delta x_1$  и, следовательно, на стабильность синхронизации лазеров, является суммарная дисперсия резонатора титан-сапфирового лазера, определяющая длительность его импульса. Наблюдаемая зависимость согласуется с выражением (3): размер области  $(\Delta x_1, \Delta x_5)$  тем больше, чем больше по модулю отрицательная дисперсия резонатора. При этом увеличение по модулю отрицательной суммарной дисперсии резонатора и сопутствующее ему увеличение длительности импульса генерации, несмотря на уменьшение интенсивности его поля, лишь улучшают стабильность синхронизации. Величина отрицательной дисперсии также определяет коэффициент пропорциональности между расстройкой  $\Delta x$  и смещением центральной длины волны спектра генерации (наклон прямой на рис.4).

Наша упрощенная модель также предсказывает, что увеличение длительности импульса накачки должно положительно сказаться на стабильности синхронизации, однако экспериментальное подтверждение этого на данный момент отсутствует.

## 4.2. Корреляционный эксперимент

В ходе первого эксперимента (см. рис.2) определялась корреляционная функция импульсов лазера накачки и титан-сапфирового лазера. Для определения качества синхронизации лазерных импульсов измеренная корреляционная функция сравнивалась (рис.5) со сверткой отдельного гауссова импульса и солитоноподобного импульса, соответствующих импульсам титан-сапфирового лазера и его накачки. Как видно из рис.5, расчетная и экспериментальная корреляционные функции практически совпадают: ширины пиков на полувысоте различаются всего на 1.2 фс, что укладывается в погрешность коррелятора ( $\pm 1$  фс). Таким образом, средняя величина временных флуктуаций импульсов относительно друг друга, измеренная в пределах доступного для коррелятора диапазона задержек ( $\sim 6$  пс) на масштабах времени более сотен миллисекунд, составляет  $\sim 1$  фс.

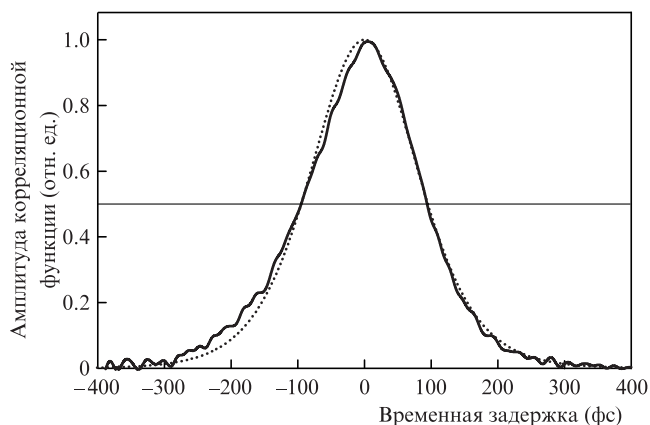


Рис.5. Экспериментально полученная корреляционная функция интенсивности импульсов иттербиевого и титан-сапфирового лазеров (ширина по полувысоте 188.8 фс) (сплошная кривая) и расчетная корреляционная функция гауссова импульса и солитона с параметрами, соответствующими измеренным для титан-сапфирового и иттербиевого лазеров (ширина по полувысоте 190.0 фс) (пунктирная кривая).

Второй эксперимент был проведен с целью определения величины временных флуктуаций на масштабе времени 10 мкс – 1 с. В ходе эксперимента с помощью кросс-корреляционной схемы и цифрового осциллографа проводилась прямая регистрация амплитуды флуктуаций. Линия задержки ЛЗ была фиксирована в положении, соответствующем перекрытию огибающих импульсов на уровне половины их амплитуды (горизонтальная линия на рис.5). При условии малости флуктуаций относительного положения импульсов во времени по сравнению с их длительностью интенсивность сигнала на суммарной оптической частоте может быть пересчитана в величину временной нестабильности между импульсами через производную корреляционной функции по времени задержки.

Нормированные спектральные плотности мощности измеренного флуктуационного сигнала и собственных шумов измерительного тракта представлены на рис.6. Из спектров удалены низкочастотные (с частотами менее 1 Гц) компоненты, связанные с изменением размера оптической плиты системы из-за колебаний температуры воды в контуре охлаждения. Низкочастотные осцилляции могут быть физически удалены благодаря использо-

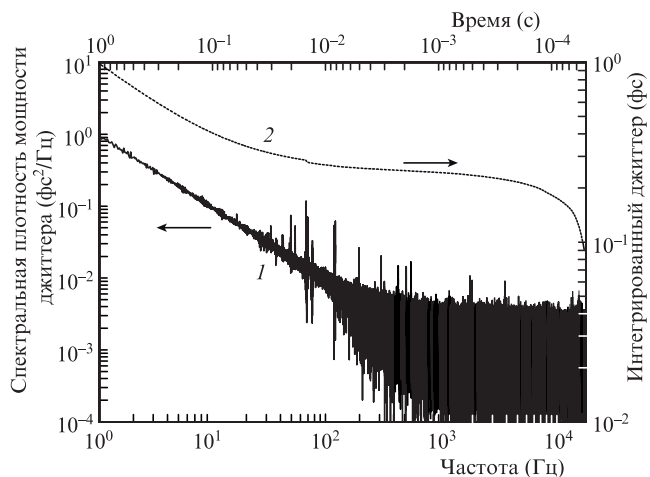


Рис.6. Спектральная плотность мощности временных флуктуаций (1) и зависимость среднеквадратичной амплитуды флуктуаций от времени наблюдения (2).

ванию более точной системы термостабилизации (например, на элементах Пельтье вместо рефрижераторной системы).

Сравнение спектров временных флуктуаций и собственного шума измерительного тракта показывает, что основная часть мощности флуктуаций приходится на спектральный диапазон 1 Гц – 25 кГц. В области средних частот (1 – 100 Гц) спектральная плотность мощности флуктуаций уменьшается как  $1/f$ , а в области 20 – 25 кГц становится меньше шумов системы детектирования. В диапазоне 25 – 250 кГц в распределении мощности по частоте флуктуаций какие-либо особенности (пики) в нашем случае отсутствуют или не видны на фоне шума детектирующей аппаратуры.

Оценка среднеквадратичной амплитуды временных флуктуаций в спектральном диапазоне 1 Гц – 20 кГц была проведена путем интегрирования полученных спектральных данных. На рис.6 кривой 2 показано интегральное значение амплитуды временных флуктуаций как функция времени наблюдения за системой, полученное интегрированием спектральной плотности мощности флуктуаций по частоте с переменным верхним пределом. Поскольку время накопления данных осциллографом во втором эксперименте составляло лишь 1 с, суммарная среднеквадратичная амплитуда относительных временных флуктуаций между двумя лазерными цугами была равна всего 1 фс.

## 5. Заключение

Нами создана лазерная система, состоящая из двух твердотельных лазерных осцилляторов с синхронизацией частот следования их импульсов с точностью до 1 фс. Предложена качественная модель, объясняющая эффект синхронизации частот, описаны режимы работы титан-сапфирового лазера при различных значениях отстройки длины его резонатора от длины резонатора лазера накачки.

Вследствие нелинейного взаимодействия импульсов накачки и генерации в активной среде титан-сапфирового лазера, проявляющегося в виде перекрестной модуляции фазы, в режиме синхронизации частота следования импульсов накачиваемого лазера точно подстраивается под заданную частоту следования импульсов накачки за счет смещения спектра собственной генерации и соответствующего изменения групповой скорости импульсов внутри резонатора. Такой механизм синхронизации позволяет обойтись без использования какой-либо дополнительной электроники.

Синхронизация лазерных осцилляторов путем синхронной накачки одного другим позволяет добиться стабильной и точной привязки частоты следования импульсов накачиваемого излучателя к частоте следования импульсов накачки. В полосе 1 Гц – 250 кГц основная часть мощности флуктуаций лазерных цугов во времени относительно друг друга приходится на акустический диапазон 1 Гц – 20 кГц. Полученная оценка средней амплитуды временных флуктуаций является оценкой сверху, поскольку учитывает также все механические колебания корпуса системы и отдельных оптических элементов, расположенных как внутри него, так и снаружи (в частности, элементы схемы регистрации относительных временных флуктуаций).

Для стабильности синхронизации генераторов критичными являются настройка резонатора титан-сапфи-

рового лазера, а также дисперсионные условия для импульса генерации в нем. Подбор длины кристалла активной среды, совмещение перетяжек излучений накачки и генерации в нем и настройка компрессора генератора позволяют добиться синхронного режима генерации двух лазеров на протяжении 3–6 ч без необходимости какого-либо внешнего компенсирующего воздействия на систему и ее элементы.

На основе представленной схемы нами изготовлен прототип системы синхронных генераторов с цепочкой обратной связи по спектру генерации накачиваемого лазера. Активная подстройка длины резонатора синхронно накачиваемого лазера позволяет увеличить время непрерывной синхронизации двух лазеров от 3–6 ч до 12 ч и более. Синхронность работы двух лазеров, входящих в состав прототипа, по-прежнему обеспечивается за счет нелинейного взаимодействия в кристалле накачиваемого генератора, в то время как задачей электроники является лишь своевременная коррекция длины резонатора одного из лазеров с целью поддержания оптимальных условий для сохранения синхронизации и для стабилизации центральной длины волны спектра. Принцип действия и прототип изобретения более полно описаны в заявке на патент РФ 2016121460/28(033586).

Подобное устройство может рассматриваться как альтернатива генераторам на кристалле титан-сапфира с непрерывной лазерной накачкой. Перечисленные преимущества перед титан-сапфировыми генераторами с традиционной схемой накачки делают такое устройство перспективным с точки зрения приложений, особенно в спектроскопии с высоким временным разрешением [25, 26], в метрологии оптических частот [27], а также для прямого оптического синтеза сверхширокополосных импульсов [28]. Последнее возможно при условии применения хорошо отработанных традиционных методов стабилизации фазы светового поля импульсов каждого из лазерных каналов, синхронизованных друг с другом по частоте с помощью предложенного метода.

1. Leitenstorfer A., Fürst C., Laubereau A. *Opt. Lett.*, **20** (8), 916 (1995).
2. Wei Z., Kobayashi Y., Zhang Z. *Opt. Lett.*, **26** (22), 1806 (2001).
3. Betz M., Sotier F., Tauser F. *Opt. Lett.*, **29** (6), 629 (2004).
4. Seitz W., Schibli T.R., Morgner U. *Opt. Lett.*, **27** (6), 454 (2002).
5. Ma L.-S., Shelton R.K., Kapteyn H.C. *Phys. Rev. A*, **64**, 021802(R) (2001).
6. Shelton R.K., Foreman S.M., Ma L.-S. *Opt. Lett.*, **27** (5), 312 (2002).
7. Kim E.B., Lee J., Trung L. *Opt. Express*, **17** (23), 20920 (2009).
8. Kubota H., Kurokawa K., Nakazawa M. *Opt. Lett.*, **13** (9), 749 (1988).
9. Stamm U., Weidner F. *Opt. Commun.*, **71** (3,4), 165 (1989).
10. Churin D., Olson J., Norwood R.A. *Opt. Lett.*, **40** (11), 2529 (2015).
11. Kobtsev S., Kukarin S., Kokhanovskiy A. *Opt. Express*, **23** (14), 18548 (2015).
12. Ell R., Angelow G., Seitz W. *Opt. Express*, **13** (23), 9292 (2005).
13. Siders C.W., Gaul E.W., Downer M.C. *Rev. Sci. Instrum.*, **65**, 3140 (1994).
14. Spielmann Ch., Krausz F., Brabec T. *Opt. Lett.*, **16** (15), 1180 (1991).
15. Борисевич Н.А., Буганов О.В., Тихомиров С.А. *Квантовая электроника*, **23** (11), 1003 (1996).
16. Борисевич Н.А., Буганов О.В., Тихомиров С.А. *Квантовая электроника*, **28** (3), 225 (1999).
17. Liu J., Wang W.W., Liu C.C. *Laser Phys. Lett.*, **7** (2), 104 (2010).
18. Pronin O., Brons J., Grasse C. *Opt. Lett.*, **36** (24), 4746 (2011).
19. Ashkin A., Gordon J.P. *Opt. Lett.*, **8** (11), 511 (1983).
20. Wei Z., Kobayashi Y., Torizuka K. *Appl. Phys. B*, **74** (1), S171 (2002).
21. Yoshitomi D., Kobayashi Y., Kakehata M. *Opt. Lett.*, **31** (22), 3243 (2006).
22. Pe'er A., Bromberg Y., Dayan B. *Opt. Express*, **15** (14), 8760 (2007).
23. Okamoto H., Tasumi M. *Rev. Sci. Instrum.*, **66** (11), 5165 (1995).
24. Chesnoy J., Fini L. *Opt. Lett.*, **11** (10), 635 (1986).
25. Stolow A., Bragg A.E., Neumark M. *Chem. Rev.*, **104**, 1719 (2004).
26. Feldmann J., Cundiff S.T., Arzberger M. *J. Appl. Phys.*, **89**, 1180 (2001).
27. Diddams S.A., Jones D.J., Ye J. *Phys. Rev. Lett.*, **84** (22), 5102 (2000).
28. Cundiff S.T., Ye J., Hall J.L. *Rev. Sci. Instrum.*, **72** (10), 3749 (2001).