

PACS 42.55.Wd; 42.62.Eh; 42.65.Re; 42.70.Mp; 78.20.Jq

# Стабилизация волоконного фемтосекундного лазера по оптическому стандарту частоты с использованием электрооптического кристалла КТР

Б.Н.Нюшков, В.С.Пивцов, Н.А.Коляда, А.Б.Каплун, А.Б.Мешалкин

*На основе кристалла КТР создан миниатюрный внутррезонаторный фазовый электрооптический модулятор (ЭОМ), который может использоваться для эффективной стабилизации гребенки оптических частот, генерируемой фемтосекундным волоконным эрбиевым лазером, по оптическому стандарту частоты. Применение такого ЭОМ позволило расширить рабочую полосу частот системы фазовой автоподстройки частоты, используемую для стабилизации лазера, до нескольких сотен килогерц. Показано, что ЭОМ на основе КТР обладает достаточной чувствительностью даже при малой оптической длине, что дает возможность легко интегрировать его в резонаторы волоконных фемтосекундных лазеров с высокой (более 100 МГц) межмодовой частотой.*

**Ключевые слова:** фемтосекундный волоконный лазер, фемтосекундный синтезатор частот, оптический стандарт частоты, электрооптический кристалл, электрооптический модулятор, фазовая автоподстройка частоты, стабилизация частоты.

## 1. Введение

Современные методы прецизионной частотной метрологии основываются на использовании так называемых гребенок оптических частот, генерируемых фемтосекундными лазерными системами [1, 2]. При этом, как правило, осуществляется стабилизация частотных параметров гребенки по опорному стандарту частоты. Такие системы иногда именуют фемтосекундными синтезаторами частот. Они позволяют решать различные метрологические задачи (измерения оптических частот, создание оптических часов, синхронизацию сверхбыстрых процессов и т. п. [3–5]) с предельно высокой точностью, ограниченной лишь нестабильностью используемого опорного стандарта частоты. Предпочтение отдается стандартам частоты оптического диапазона, которые могут обеспечить более высокую стабильность в сравнении с радиочастотными (РЧ) стандартами и быть при этом достаточно компактными. Использование их вместе с преимущественно волоконными лазерными системами позволяет создавать компактные транспортируемые (или даже мобильные) фемтосекундные синтезаторы частот и оптические часы [6–8].

Высококачественная стабилизация гребенки оптических частот по стандарту частоты осуществляется с помо-

щью электронных систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). В такой системе сигнал ошибки с выхода фазового детектора подается по цепи обратной связи (ОС) на исполнительные элементы, которые компенсируют случайные изменения параметров и внешние возмущения задающего фемтосекундного лазера, вызывающие частотные флуктуации и фазовые шумы. Чаще всего исполнительными элементами в резонаторах задающих фемтосекундных лазеров являются пьезокерамические трансляторы, с помощью которых осуществляется подстройка оптической длины резонатора. Быстродействие таких трансляторов (доступная для обработки возмущений полоса частот) ограничивается механическими (акустическими) резонансами колебательной системы, которую образует стойка с пьезокерамикой и закрепленным на ней зеркалом (или волоконным световодом), а также сравнительно быстрым падением модуляционной чувствительности с увеличением частоты прикладываемого к обкладкам пьезокерамики напряжения [8]. Кроме того, ограничивающим фактором является суммарный фазовый набег во всей цепи ОС, включающей пьезокерамику. Как правило, даже при использовании быстрых миниатюрных пьезотрансляторов и специальных низкочастотных стоек для них ширина полосы обработки возмущений и подавления шумов с помощью ФАПЧ не превышает нескольких десятков килогерц.

С подобными ограничениями авторы столкнулись при разработке компактного волоконного фемтосекундного синтезатора частот, стабилизируемого по оптическим стандартам частоты [8]. В основе синтезатора лежит эрбиевый волоконный фемтосекундный лазер с самосинхронизацией мод. Его активная среда характеризуется большим временем жизни верхнего лазерного уровня (несколько миллисекунд), что сильно ограничивает быстродействие механизма подстройки частоты лазера посредством изменения мощности накачки. Частотная модуляция лазера таким способом возможна лишь в полосе до  $\sim 10$  кГц [9]. Следовательно, использование этого механизма в системе ФАПЧ также не могло бы обеспечить более широкую по-

**Б.Н.Нюшков.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: nyushkov@laser.nsc.ru

**В.С.Пивцов.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630092 Новосибирск, просп. К.Маркса, 20; e-mail: clock@laser.nsc.ru

**Н.А.Коляда.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: n.koliada@mail.ru

**А.Б.Каплун, А.Б.Мешалкин.** Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 1; e-mail: kaplun@itp.nsc.ru, a.meshalkin@mail.ru

Поступила в редакцию 29 января 2015 г., после доработки – 6 февраля 2015 г.

лосу обработки возмущений частоты лазера, поэтому единственной возможностью для значительного расширения полосы ФАПЧ является применение внутрирезонаторного фазового электрооптического модулятора (ЭОМ). Увеличение быстродействия подавления возмущений с помощью ЭОМ могло бы улучшить кратковременную стабильность разрабатываемого синтезатора, а также повысить устойчивость и надежность работы системы ФАПЧ в условиях сильных внешних возмущений, характерных для эксплуатации мобильных систем.

Однако интеграция традиционных объемных (на основе кристаллов ниобата или танталата лития) или телекоммуникационных (типа используемого в [10]) ЭОМ в резонатор задающего фемтосекундного волоконного лазера далеко не всегда возможна или эффективна. Это, в частности, связано с требованием минимальности оптической длины такого модулятора (желательно менее одного сантиметра) во избежание значительного увеличения длины резонатора и, как следствие, уменьшения межмодовой частоты лазера (как правило, приемлемая межмодовая частота синтезатора должна быть не менее 100 МГц). Кроме того, необходимо минимизировать вносимую хроматическую дисперсию, чтобы сохранить оптимальный режим самосинхронизации мод и минимальную длительность импульсов, что является критическим фактором для генерации надлежащего спектрально-суперконтинуума в фемтосекундном синтезаторе частот. При этом модулятор должен обладать достаточной чувствительностью для подстройки оптических частот задающего лазера без необходимости подачи высокого (более 100 В) напряжения на его обкладки.

В настоящей работе нами впервые было предложено использовать калий титанит фосфат  $\text{KTiOPO}_4$  (КТР) в качестве электрооптического материала для внутрирезонаторного фазового ЭОМ. Данный электрооптический кристалл обладает целым рядом преимуществ перед упомянутыми традиционными электрооптическими материалами. Так, КТР характеризуется значительно меньшей эффективностью преобразования электрических напряжений в механические (пьезоэффект). Как известно, пьезоэффект вызывает «звон» электрооптических кристаллов при подаче переменного напряжения. Для подавления «звона» в объемных модуляторах с кристаллами ниобата и танталата лития используют специальные демпфирующие конструкции, что существенно увеличивает стоимость и габариты этих устройств. У кристалла КТР интенсивность «звона» в 30 раз меньше, чем у ниобата лития, а электрооптический эффект больше на 30% [11, 12]. Кроме того, из-за плохих пьезоэлектрических свойств у КТР удельные значения полуволнового напряжения в статическом и динамическом режимах практически не различаются, в то время как у ниобата и танталата лития они различаются в несколько раз.

Важным преимуществом кристалла КТР является малая абсолютная величина хроматической дисперсии на длине волны генерации задающего фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера. На длине волны 1.55 мкм КТР обладает аномальной дисперсией, приблизительно равной  $-100 \text{ фс}^2/\text{см}$ , что по абсолютной величине даже меньше дисперсии стандартного телекоммуникационного волокна, используемого в конструкции лазера. Для сравнения на той же длине волны ниобат лития имеет нормальную дисперсию, приблизительно равную  $+1000 \text{ фс}^2/\text{см}$ , что, в совокупности с большей требуемой для модулятора

длиной кристалла, вынуждает применять дополнительные конструктивные меры для компенсации его дисперсии в резонаторе лазера [13].

Перечисленные особенности и преимущества кристалла КТР делают его перспективным кандидатом на роль нового электрооптического материала для создания миниатюрного внутрирезонаторного фазового ЭОМ, предназначенного для эффективной стабилизации компактного фемтосекундного эрбиевого волоконного лазера с высокой (не менее 100 МГц) межмодовой частотой по оптическому стандарту частоты (ОСЧ). Целью настоящей работы являлось создание подобного ЭОМ и его предварительная экспериментальная апробация в конструкции волоконного фемтосекундного синтезатора частот, а также предварительное исследование достигнутых характеристик стабилизации.

## 2. Экспериментальная часть

Выращивание монокристаллов КТР осуществлялось из полифосфатных растворов-расплавов модифицированным методом Чохральского на ориентированную в направлении оси  $x$  затравку в градиентном температурном поле. Полученные нами кристаллы, из которых для решения различных задач изготавливались ориентированные монодоменные элементы, обладают малой электропроводностью (до  $10^{-11} - 10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ ), высокой оптической однородностью, малым оптическим поглощением, высокой лучевой стойкостью. Несмотря на то что требования к характеристикам рабочих элементов из КТР для оптических фазовых модуляторов существенно ниже, чем требования к характеристикам кристаллов для амплитудных модуляторов, в настоящей работе были использованы кристаллы КТР с приведенными выше характеристиками, предназначенные для решения широкого круга задач лазерной физики и техники (результаты изучения характеристик полученных нами кристаллов изложены в [14–16]). В частности, этот выбор связан с тем, что при длительной эксплуатации фазового модулятора с рабочими элементами из «стандартного» КТР с проводимостью  $10^{-6} - 10^{-8} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$  [11, 12] существует вероятность электрохромной деградации, обусловленной протеканием ионного тока калия под действием приложенного напряжения. При использовании полученных нами кристаллов с проводимостью  $3 \times 10^{-11} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$  [15] электрохромная деградация при работе фазового модулятора полностью отсутствовала. Электрооптический эффект в КТР максимален при поперечной схеме использования, когда электрическое поле направлено по оси  $z$ , линейно поляризованное излучение распространяется вдоль оси  $x$ , а его поляризация ориентирована по оси  $z$ .

При выборе размеров рабочего кристалла мы учитывали, что измеренный размах кратковременных флуктуаций оптических частот, соответствующих продольным модам нашего лазера, не превышает 1 МГц (межмодовая частота  $\sim 100$  МГц). Максимальное напряжение на кристалле, приемлемое для разрабатываемого на его основе компактного фемтосекундного синтезатора частот, не должно превышать 100 В. Таким требованиям по диапазону подстройки и вольтажу (с учетом расчетного полуволнового напряжения) удовлетворяет кристалл КТР размерами  $3 \times 4 \times 3$  мм (по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Бездефектный оптический элемент с такими размерами был вырезан из монокристаллического сектора более крупного кристалла. На полирован-

ные грани, перпендикулярные оси  $x$ , были нанесены просветляющие покрытия ( $R < 0.1\%$ ). Металлическое покрытие из хрома на шлифованных гранях, перпендикулярных оси  $z$ , служило в качестве электродов, к которым прикладывалось управляющее напряжение. Расчетная емкость конденсатора при указанных размерах рабочего элемента составляет  $\sim 0.5$  пф, а частота первого механического резонанса  $\sim 800$  кГц, что позволяет считать возможным эффективное подавление частотно-фазовых возмущений в лазере в полосе частот до нескольких сотен килогерц. Для кристалла был разработан миниатюрный держатель, линейный размер которого по направлению распространения излучения превышал соответствующий размер кристалла всего на несколько миллиметров.

Созданный таким образом объемный ЭОМ был установлен в резонатор задающего фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера, используемого в составе ранее разработанного нами прототипа фемтосекундного синтезатора частот [8]. В соответствии с этим схема резонатора лазера была видоизменена (рис.1). Местоположение ЭОМ в резонаторе выбрано исходя из требования линейной поляризации излучения, ориентированной по оси  $z$  кристалла, и с учетом конструктивной особенности расположения электродов. Как и в случае исходной схемы лазера с пьезокерамическими трансляторами в качестве исполнительных элементов ФАПЧ, в данной схеме режим самосинхронизации мод также достигается за счет эффекта нелинейной эволюции состояния поляризации. В качестве поляризационного дискриминатора используется поляризационный кубик (поляризационный делитель), который связывает кольцевую и линейную части резонатора. Последняя ограничена зеркалом, закрепленным на пьезотрансляторе. Этот пьезотранслятор служит исполнительным механизмом в «медленном» контуре ОС системы ФАПЧ. Он предназначен для компенсации медленных частотных дрейфов и возмущений в полосе частот 0–100 Гц (имеющих, как правило, большую амплитуду). ЭОМ же предназначен для «быстрого» контура ОС системы ФАПЧ, где должен обеспечивать эффективное подавление частотных возмущений и фазовых шумов в полосе частот от  $\sim 100$  Гц до нескольких сотен килогерц. Нами используется та же система ФАПЧ, что и ранее в работе [8]. Однако в выходную цепь фазочастотного де-

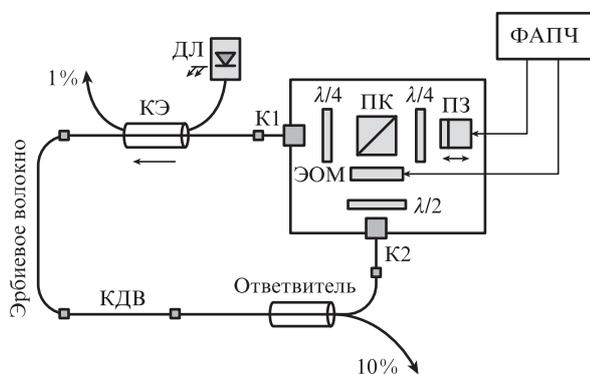


Рис.1. Схема задающего фемтосекундного волоконного лазера с внутрирезонаторным ЭОМ на основе кристалла КТР:

ДЛ – диодный лазер накачки; КЭ – комбинированный элемент (волоконно-оптический изолятор + спектральный мультиплексор + ответвитель); К1, К2 – волоконно-оптические коллиматоры; ПК – поляризационный кубик; ПЗ – пьезотранслятор, на котором закреплено плотное зеркало; КДВ – компенсирующее дисперсию волокно.

тектора, формирующую «быстрый» контур ФАПЧ, был добавлен регулируемый высоковольтный усилитель для обеспечения требуемой амплитуды сигнала (до 100 В) на ЭОМ. Также была скорректирована АЧХ всей петли ОС ФАПЧ с учетом возможностей и характеристик ЭОМ. Измеренная чувствительность ЭОМ на сдвиг оптической частоты продольной моды лазера составила  $\sim 11$  кГц/В, что соответствует проведенному расчету.

Общая схема экспериментальной установки для исследования возможностей стабилизации компактного волоконного фемтосекундного синтезатора частот по оптическому стандарту частоты осталась почти неизменной по сравнению с приведенной в работе [8]. Стабилизация коротковолнового края уширенной гребенки оптических частот, генерируемой фемтосекундным синтезатором в спектральном диапазоне 0.9–2.2 мкм, осуществлялась по длинноволновому реперу ( $\lambda_{\text{ofs}} \approx 1064$  нм) оптического стандарта частоты на основе Nd:YAG/I<sub>2</sub> [7, 8], но уже с применением разработанного нами ЭОМ, использующего кристалл КТР. Кроме того, была проверена возможность стабилизации длинноволнового края гребенки оптических частот синтезатора. Для этого по оптическому стандарту осуществлялась автоподстройка удвоенной в нелинейном кристалле частоты длинноволновой компоненты ( $\sim 2128$  нм) гребенки оптических частот.

### 3. Результаты и обсуждение

Благодаря короткой длине электрооптического кристалла (3 мм), малой величине вносимой им хроматической дисперсии, а также качественному просветляющему покрытию на входной и выходных гранях кристалла, его установка в резонатор задающего фемтосекундного лазера не привела к значительному изменению параметров генерации. Кроме того, сравнительно слабое двулучепреломление в плоскости  $xu$  упростило установку кристалла в резонатор – она оказалась слабо критичной к угловой юстировке кристалла. В итоге основные параметры излучения задающего лазера остались почти такими же, как и в исходной конструкции без ЭОМ [8]: центральная длина волны  $\sim 1.56$  мкм, ширина спектра около 30 нм, длительность импульсов около 150 фс, частота следования импульсов  $\sim 100$  МГц, средняя выходная мощность  $\sim 14$  мВт. На рис.2 представлен РЧ спектр межмодовых биений лазера. Межмодовая частота лазера может варьироваться (механическим перемещением стойки с пьезотранслятором ПЗ) в диапазоне 100–103 МГц. На рис.3 приведен РЧ

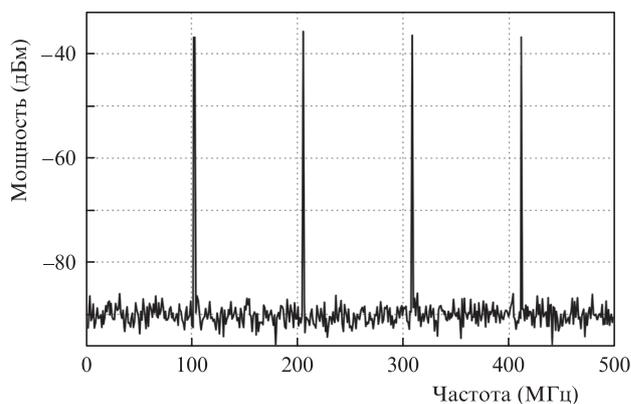


Рис.2. РЧ спектр межмодовых биений задающего фемтосекундного волоконного лазера. Разрешение анализатора 100 кГц.

спектр биений длинноволнового репера опорного оптического стандарта Nd:YAG/I<sub>2</sub> с крайними спектральными компонентами (коротковолновая на  $\lambda_1 \approx 1064$  нм и удвоенная по частоте длинноволновая на  $\lambda_2 \approx 2128$  нм) гребенки оптических частот фемтосекундного синтезатора частот, созданного на основе этого лазера. Одновременное детектирование двух сигналов биений стало возможным после того, как в исходную схему экспериментальной установки [8] был добавлен нелинейный кристалл PPLN для удвоения частоты длинноволновой компоненты гребенки оптических частот синтезатора.

Как и в работе [8], эффективность стабилизации коротковолнового края гребенки оптических частот синтезатора по оптическому стандарту частоты оценивалась путем исследования характеристик сигнала биений между длинноволновым репером опорного оптического стандарта частоты и стабилизируемой по нему посредством ФАПЧ ближайшей коротковолновой (~1064 нм) компонентой гребенки оптических частот.

В первую очередь проводилось измерение РЧ спектра сигнала биений. Для этого использовался широкополосный радиочастотный анализатор спектра RODE&SCHWARZ FSW, на вход которого подавался сигнал с выхода фотодиода, являющегося частью соответствующего волоконно-оптического смесителя в схеме синтезатора. Ключевыми параметрами спектра сигнала биений для оценки системы стабилизации являются ширина и форма линии, скорость частотного дрейфа, отношение сигнал/шум. Соответствующие результаты измерений РЧ спектра биений между частотой опорного оптического стандарта и ближайшей оптической частотой синтезатора в свободном режиме и в режиме работающей ФАПЧ приведены на рис.4. Результаты этих измерений показали, что в свободном режиме работы синтезатора сигнал биений испытывает очень сильные частотные возмущения – РЧ спектр сигнала уширен из-за акустического джиттера почти до 0.5 МГц и, как следствие, имеет неправильную (нелоренцевскую) форму (кривая 1). Кроме того, наблюдается сильный частотный дрейф со скоростью 0.1–0.5 МГц/с, обусловленный тепловыми и механическими релаксационными процессами в резонаторе задающего фемтосекундного лазера синтезатора. Тем не менее отношение сигнал/шум для биений (определяемое как отношение максимальной мощности сигнала к шумовому порогу) достигает примерно

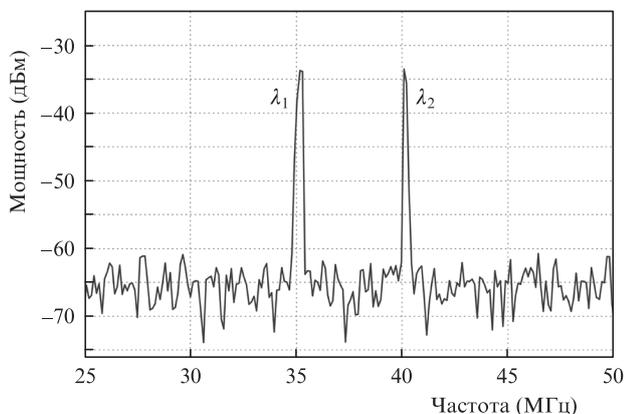


Рис.3. РЧ спектр биений длинноволнового репера опорного оптического стандарта Nd:YAG/I<sub>2</sub> с крайними спектральными компонентами (коротковолновая на  $\lambda_1 \approx 1064$  нм и удвоенная по частоте длинноволновая на  $\lambda_2 \approx 2128$  нм) гребенки оптических частот фемтосекундного синтезатора частот. Разрешение анализатора 100 кГц.

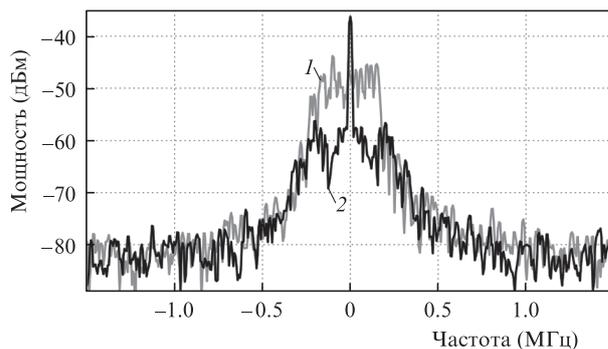


Рис.4. РЧ спектры сигнала биений между длинноволновым репером опорного оптического стандарта частоты и стабилизируемой по нему посредством ФАПЧ коротковолновой (~1064 нм) компонентой гребенки оптических частот: 1 – спектр в свободном режиме синтезатора (система ФАПЧ не активна), 2 – спектр при включенной системе ФАПЧ синтезатора. По горизонтальной шкале – отстройка от центральной частоты сигнала биений, равной 20.0 МГц. Разрешение анализатора 10 кГц.

30 дБ, что является достаточным для уверенной работы блоков ФАПЧ в синтезаторе.

Включение ФАПЧ с использованием ЭОМ эффективно стабилизирует частоту биений, о чем свидетельствует РЧ спектр (кривая 2 на рис.4). Ширина линии резко уменьшается. Остается лишь небольшой пьедестал неподдавленных фазовых шумов. Частотный дрейф прекращается (он обрабатывается медленной петлей ФАПЧ). Исследование спектра биений с более высоким разрешением (рис.5) позволяет установить, что ФАПЧ эффективно обрабатывает возмущения (подавляет шумы) в полосе частот до ~220 кГц. При этом сама спектральная линия становится

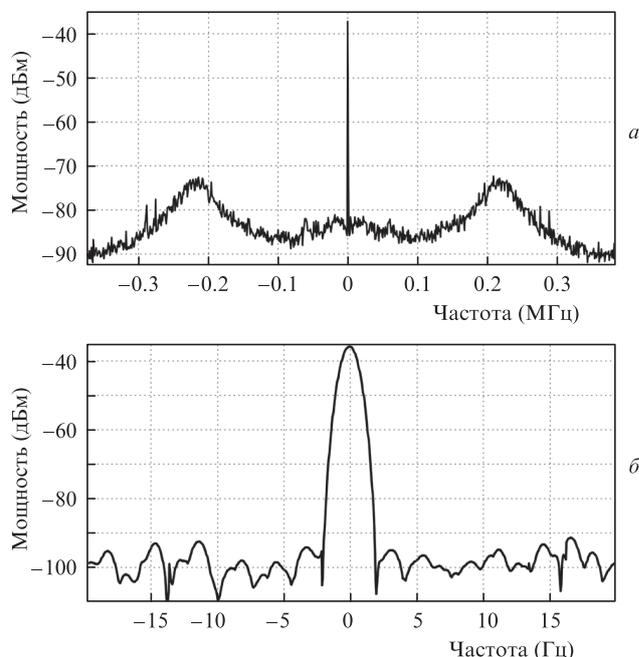


Рис.5. РЧ спектры сигнала биений между длинноволновым репером опорного оптического стандарта частоты и стабилизируемой по нему посредством ФАПЧ коротковолновой (~1064 нм) компонентой гребенки оптических частот, снятые при разрешении анализатора 30 Гц (подъем пьедестала остаточных шумов на краях спектра примерно соответствует границе рабочей полосы частот системы ФАПЧ с ЭОМ) (а) и при разрешении анализатора 1 Гц (ширина линии по уровню -3 дБ ограничена разрешением анализатора) (б). По горизонтальной шкале – отстройка от центральной частоты сигнала биений, равной 20.0 МГц.

предельно узкой (субгерцевой) и стремится принять более правильную (лоренцевскую) форму. Исследование остаточного сигнала ошибки с выхода фазочастотного детектора с помощью осциллографа показало, что в полосе частот от 0 до 5 МГц мгновенные значения фазовой ошибки по абсолютной величине не превышают 0.5 рад.

Следующим этапом исследования являлось долговременное прецизионное измерение частоты сигнала биений, проводимое с помощью прецизионного частотомера Pendulum CNT-91, на опорный вход которого подавался сигнал от того же водородного стандарта частоты (модель Ч1-75), что и на опорный вход фазочастотного детектора в системе ФАПЧ. Поверенная относительная случайная погрешность измерения радиочастоты с помощью данного частотомера позволяет проводить измерения долговременной нестабильности радиочастоты мегагерцевого диапазона на уровне  $\sim 10^{-13}$  (за времена усреднения не менее 100 с).

В результате были записаны абсолютные значения частоты сигнала биений, последовательно измеренные в течение продолжительного (более 5000 с) времени (рис.6). Время единичного измерения составляло 1 с, «мертвого» времени между измерениями нет. С использованием специализированной компьютерной программы AlaVar 5.0 рассчитывался параметр Аллана (стандартное отклонение Аллана) [17, 18] для относительных случайных отклонений частоты биений от опорной радиочастоты (равной 20.0 МГц). На рис.7 построена его зависимость от времени усреднения  $\tau$  (математически  $\tau$  – это время усреднения единичной выборки, совпадающее с временным интервалом между выборками в измерениях частоты). Из полученных данных следует, что относительная нестабильность радиочастоты сигнала биений, выраженная через параметр Аллана, находится в диапазоне от  $\sim 4.1 \times 10^{-10}$  (для  $\tau = 1$  с) до  $\sim 1.8 \times 10^{-11}$  (для  $\tau = 1000$  с).

Оценить нестабильность собственно оптической частоты коротковолновой компоненты ( $\sim 1064$  нм) гребенки частот синтезатора относительно опорного оптического стандарта частоты, по которому она стабилизируется системой ФАПЧ, можно, если пересчитать нестабильность измеряемой радиочастоты сигнала биений относительно значения соответствующей оптической частоты ( $\nu_1 \approx 282 \times 10^{12}$  Гц). Пересчет параметра Аллана для случайных отклонений оптической частоты коротковолновой компоненты ( $\sim 1064$  нм) гребенки оптических частот синтезатора от частоты опорного оптического стандарта, по которому осуществляется стабилизация этой компоненты, дает значения параметра от  $\sim 2.7 \times 10^{-17}$  (для  $\tau = 1$  с) до менее  $1 \times 10^{-18}$  (для  $\tau = 1000$  с), как показано на рис.8. Эти значения характеризуют относительную случайную частотную погрешность, вносимую системой ФАПЧ, и определяют ее предельные возможности по переносу стабильности оптических стандартов частоты на коротковолновый край гребенки оптических частот синтезатора.

Следует отметить, что измеренные значения вносимой нестабильности (погрешности ФАПЧ) на порядок меньше аналогичных значений, полученных нами ранее [8] без использования ЭОМ в резонаторе задающего фемтосекундного волоконного лазера. Это является закономерным результатом значительного расширения (благодаря разработанному внутрирезонаторному ЭОМ) полосы частот, в которой система ФАПЧ способна эффективно обрабатывать возмущения и подавлять шумы.

Аналогичным образом исследовалась эффективность применения ЭОМ для стабилизации длинноволнового края гребенки оптических частот синтезатора. Измерялись характеристики сигнала биений между длинноволновым репером опорного оптического стандарта частоты и стабилизируемой по нему посредством ФАПЧ второй гармоникой длинноволновой ( $\sim 2128$  нм) компоненты гребенки оптических частот. Результаты измерений оказались близкими к тем, которые были получены при стабилизации коротковолнового края гребенки оптических частот, поэтому в рамках настоящей статьи мы не приводим их отдельно.

Таким образом, разработанный внутрирезонаторный ЭОМ на базе кристалла КТР может одинаково эффективно использоваться для стабилизации по оптическому стандарту как коротковолнового, так и длинноволнового края гребенки оптических частот в фемтосекундном синтезаторе. Очевидно, что при необходимости он может быть также эффективно использован для стабилизации межмодового интервала (межмодовой частоты) задающего фемтосекундного волоконного лазера, как это делается с использованием модулятора на основе ниобата лития [13]. Однако, в отличие от работы [13], использование кристалла КТР позволяет сделать лазер с существенно

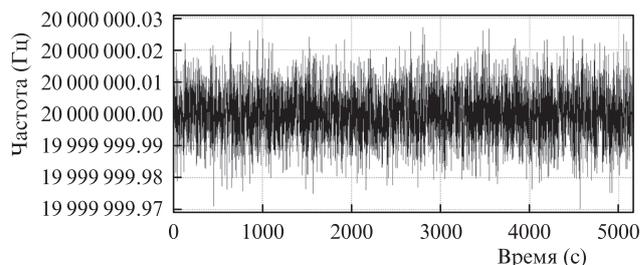


Рис.6. Временная диаграмма измерения абсолютных значений частоты сигнала биений между длинноволновым репером опорного оптического стандарта частоты и стабилизируемой по нему посредством ФАПЧ коротковолновой ( $\sim 1064$  нм) компоненты гребенки оптических частот. Время единичного измерения 1 с.

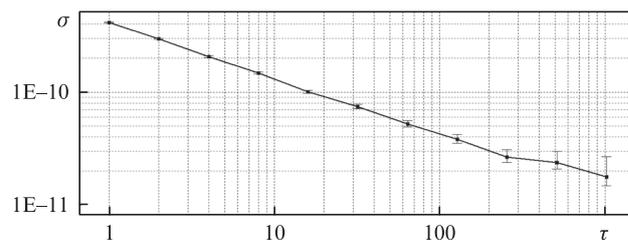


Рис.7. Параметр Аллана (стандартное отклонение Аллана) для измеренных значений частоты сигнала биений.

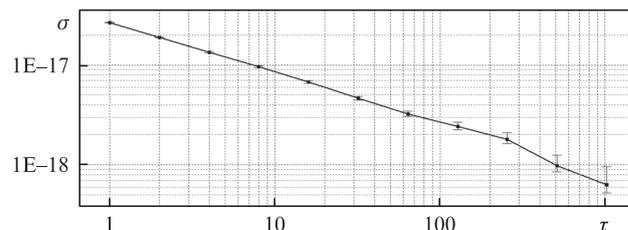


Рис.8. Параметр Аллана (стандартное отклонение Аллана), пересчитанный для случайных отклонений оптической частоты коротковолновой компоненты ( $\sim 1064$  нм) гребенки оптических частот синтезатора от частоты опорного оптического стандарта, по которому осуществляется стабилизация этой компоненты.

более высокой межмодовой частотой благодаря очень малой его оптической длине и отсутствию необходимости вносить дополнительные элементы для компенсации дисперсии этого кристалла.

Разработанный нами ЭОМ на основе кристалла КТР эксплуатировался в резонаторе задающего фемтосекундного волоконного лазера достаточно продолжительное время (около полугода), по истечении которого не было выявлено никаких явных признаков электрохромной деградации и ухудшения оптических свойств кристалла.

#### 4. Заключение

Таким образом, нами экспериментально продемонстрировано, что на основе качественного кристалла КТР (КТiOPO<sub>4</sub>) с низкой электропроводностью может быть разработан и изготовлен надежный миниатюрный фазовый электрооптический модулятор. Такой модулятор, благодаря своей небольшой оптической длине и малой хроматической дисперсии, легко интегрируется в короткие резонаторы фемтосекундных волоконных эрбиевых лазеров с высокой фундаментальной частотой повторения импульсов (высокой межмодовой частотой) без ухудшения параметров генерации. При использовании модулятора в быстром контуре ОС системы ФАПЧ, он позволяет осуществлять эффективную стабилизацию компонента гребенки оптических частот лазера по опорному оптическому стандарту частоты, обрабатывая возмущения и подавляя шумы в широкой (до нескольких сотен кГц) полосе частот. Это может значительно упростить реализацию компактных мобильных фемтосекундных синтезаторов частот для решения широкого круга метрологических задач.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения» (Проект 5.2), гранта Президента Российской Федерации (НШ-4096.2014.2), Минобрнауки РФ (заказ № 3.162. 2014/К), Федерального агентства научных организаций (проект № 01201374304 и др.) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Фемтосекундный лазерный комп-

лекс». Авторы также выражают признательность А.В.Горчакову, С.А.Фарносову и А.А.Луговому за помощь при выполнении работы.

- Ye J., Cundiff S.T. (Eds) *Femtosecond Optical Frequency Comb Technology: Principle, Operation and Application* (New York: Springer, 2005).
- Udem T., Holzwarth R., Hansch T. *Eur. Phys. J. Special Topics*, **172**, 69 (2009).
- Beverini N., Carelli G., De Michele A., Maccioni E., Nyushkov B., Sorrentino F., Moretti A. *Opt. Lett.*, **30**, 32 (2005).
- Bagayev S.N., Denisov V.I., Klementyev V.M., Korel I.I., Kuznetsov S.A., Pivtsov V.S., Zakharyash V.F. *Laser Phys.*, **14**, 1367 (2004).
- Bagayev S.N., Trunov V.I., Pestryakov E.V., Frolov S.A., Leshchenko V.E., Kokh A.E., Vasiliev V.A. *Laser Phys.*, **24**, 074016 (2014).
- Gubin M.A., Kireev A.N., Konyashchenko A.V., Kryukov P.G., Shelkovnikov A.S., Tausenev A.V., Tyurikov D.A. *Appl. Phys. B*, **95**, 661 (2009).
- Korel I.I., Nyushkov B.N., Denisov V.I., Pivtsov V.S., Koliada N.A., Sysolyatin A.A., Ignatovich S.M., Kvashnin N.L., Skvortsov M.N., Bagaev S.N. *Laser Phys.*, **24**, 074012 (2014).
- Пивцов В.С., Ньюшков Б.Н., Корель И.И., Коляда Н.А., Фарносов С.А., Денисов В.И. *Квантовая электроника*, **44**, 507 (2014).
- Haverkamp N., Hundertmark H., Fallnich C., Telle H.R. *Appl. Phys. B*, **78**, 321 (2004).
- Коляда Н.А., Ньюшков Б.Н., Иваненко А.В., Кобцев С.М., Харпер П., Турицын С.К., Денисов В.И., Пивцов В.С. *Квантовая электроника*, **43**, 95 (2013).
- Bierlein J.D., Vanherzeele H. *J. Opt. Soc. Am. B*, **6**, 622 (1989).
- Bierlein J.D., Arweiler C.B. *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 917 (1986).
- Hudson D.D., Holman K.W., Jones R.J., Cundiff S.T., Ye J., Jones D.J. *Opt. Lett.*, **30**, 2948 (2005).
- Rusov V.A., Gorchakov A.V., Belostotsky A.L., Sapojnikov V.K., Kaplun A.B., Meshalkin A.B., Shapovalov V.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4350**, 117 (2001).
- Русов В.А., Серябряков В.А., Каплун А.Б., Горчаков А.В. *Оптический журн.*, **76**, 6 (2009).
- Русов В.А., Захарова Н.А., Каплун А.Б., Мешалкин А.Б., Горчаков А.В. *Оптический журн.*, **80**, 11 (2013).
- IEEE Standard 1139–1999. Doi:10.1109/IEEESTD.1999.90575.
- Riley W.J. *Handbook of Frequency Stability Analysis. NIST Special Publication 1065* (Washington: U.S. Government printing office, 2008).