

Реализация компактных метановых оптических часов

М.А.Губин, А.Н.Киреев, А.В.Конященко, П.Г.Крюков,
А.В.Таусенев, Д.А.Тюриков, А.С.Шелковников

Реализованы компактные оптические часы на основе двухмодового He–Ne/CH₄-оптического стандарта частоты и фемтосекундного волоконного Er³⁺-лазера и измерена их стабильность относительно промышленного водородного стандарта частоты.

Ключевые слова: оптические часы, волоконный фемтосекундный лазер, генерация разностной частоты, метан, гелий-неоновый лазер.

Компактные оптические часы с низким уровнем фазовых шумов, высокой кратковременной стабильностью частоты (10^{-14} – 10^{-15} за 1 с) и долговременной стабильностью, близкой к стабильности водородного лазера (Н-мазера), необходимы для развития частотно-временных методов измерений в радиоастрономии, навигации, для создания стандартов частоты на лазерно-охлажденных атомах/ионах и др.

Одним из кандидатов на роль задающего генератора в таких часах является новое поколение компактных двухмодовых He–Ne-лазеров ($\lambda = 3.39$ мкм), стабилизированных по резонансам насыщенного поглощения/дисперсии метана (He–Ne/CH₄-ОСЧ, оптический стандарт частоты) и обладающих уже сейчас стабильностью 1×10^{-14} за 1 с [1]. Повышение на 2–3 порядка пассивной стабильности резонатора и контроль внешних условий, возможный при использовании моноблочных ситалловых резонаторов, позволит улучшить до требуемых значений и долговременную стабильность метановых ОСЧ.

С 2000 г. для переноса высокой стабильности оптических стандартов в радиодиапазон используются непрерывные фемтосекундные лазеры с пассивной синхронизацией мод, и первые оптические часы нового поколения были реализованы в Гаршинге и Боулдере с помощью титан-сапфирового фемтосекундного лазера ($\lambda = 0.8$ мкм) [2]. Спектр излучения таких лазеров состоит из «гребенки» эквидистантных оптических компонент с частотами $\nu_m = m f_{\text{греб}} + f_0$, где $m \sim 10^6$ – целое число, $f_{\text{греб}}$ – частота следования импульсов, f_0 – сдвиг гребенки относительно нулевой частоты; $f_{\text{греб}}$ и f_0 лежат в радиодиапазоне. В

результате, используя данное соотношение, можно установить прямую фазово-когерентную связь оптического и радиодиапазонов путем контроля двух параметров гребенки – $f_{\text{греб}}$ и f_0 [2].

Если частота оптического стандарта ν_{st} меньше ширины гребенки, то схему оптических часов можно существенно упростить, исключив величину f_0 преобразованием спектра гребенки в нелинейном кристалле [3, 4]. При выполнении в кристалле условия фазового синхронизма для компонент гребенки с разностью частот, близкой к ν_{st} , можно получить новую гребенку на разностных частотах (ГРЧ), лежащую в среднем ИК диапазоне, где ее спектр перекрывает частоту ν_{st} . Поскольку частоты двух областей начальной гребенки есть $\nu_m = (m f_{\text{греб}} + f_0)$ и $\nu_n = (n f_{\text{греб}} + f_0)$, то частоты ГРЧ – соответственно $\nu_k = k f_{\text{греб}}$, где $k = m - n$. Здесь отсутствует зависимость от f_0 , и при «сбивании» ГРЧ с излучением стандарта устанавливается прямая фазово-когерентная связь частот $f_{\text{греб}}$ и ν_{st} : $f_b = \nu_{\text{st}} - k f_{\text{греб}}$, где f_b – частота сигнала биений, также лежащая в радиодиапазоне.

Оптические часы на основе He–Ne/CH₄-ОСЧ и фемтосекундного титан-сапфирового лазера с применением ГРЧ описаны в [4], где показана их перспективность для создания задающих радиогенераторов с низким уровнем фазовых шумов. Однако серьезные недостатки фемтосекундных титан-сапфировых лазеров (громоздкость и высокая стоимость лазера накачки, проблематичность поддержания длительной стабильной работы и др.) стимулировали разработку «часового механизма» для оптических часов в виде надежных и относительно недорогих волоконных фемтосекундных лазеров [5].

В настоящей работе впервые сообщается о реализации компактных оптических метановых часов по следующей схеме: «задающий генератор» (двухмодовый He–Ne/CH₄-ОСЧ), «переносчик частоты» (фемтосекундная волоконная лазерная система), «интерфейс» между ними (периодически поляризованный кристалл ниобата лития (ППНЛ)).

Фемтосекундная волоконная лазерная система, используемая в эксперименте, аналогична описанной в [6] и состоит из волоконного фемтосекундного Er³⁺-генератора ($\lambda = 1.55$ мкм) с частотой следования импульсов $f_{\text{греб}} = 62$ МГц, волоконного Er³⁺-усилителя и отрезка волокна с высокой нелинейностью (длина ~ 0.5 м), соз-

М.А.Губин, А.Н.Киреев, Д.А.Тюриков, А.С.Шелковников. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: gubin@sci.lebedev.ru, kireev@okb.lpi.troitsk.ru
А.В.Конященко. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; ООО «Авеста-Проект», Россия, Московская обл., 142190 Троицк, ул. Солнечная, 12
П.Г.Крюков. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kryukov@fo.gpi.ru

А.В.Таусенев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; «Авеста-Проект», Россия, Московская обл., 142190 Троицк, ул. Солнечная, 12

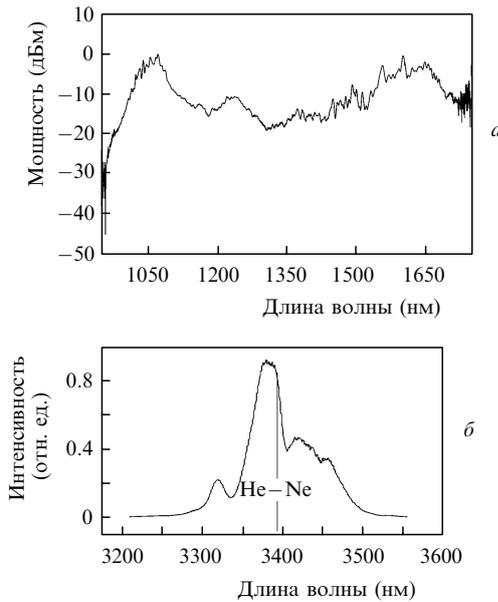


Рис.1. Спектр излучения суперконтинуума на выходе волокна с высокой нелинейностью (спектральное разрешение 2 нм) (а) и спектр излучения на разностной частоте после кристалла ППНЛ (разрешение 4 нм) (б).

дающего спектр суперконтинуума в диапазоне 1.0–2.0 мкм (рис.1,а).

Процесс образования ГРЧ происходил в кристалле ППНЛ при взаимодействии излучения двух областей (1.06 и 1.55 мкм) начальной гребенки. В результате возникало излучение на длине волны ~ 3.4 мкм (рис.1,б) шириной ~ 50 нм. Полная мощность ГРЧ составляла ~ 20 мкВт, что соответствует мощности P_k отдельной спектральной компоненты ~ 1 нВт.

Для фазовой привязки $f_{\text{грп}}$ фемтосекундного Er^{3+} -лазера использовался промежуточный одночастотный He-Ne -лазер-гетеродин мощностью 1.3 мВт, фазово-когерентно связанный с He-Ne/CH_4 -стандартом. Фотодетектор регистрировал сигнал биений между частотами излучения He-Ne -лазера и k -й компоненты ИК гребенки на частоте биений $f_b = kf_{\text{грп}} - \nu_{\text{He-Ne}}$ с отношением сигнал/шум 25–30 дБ в полосе 100 кГц (рис. 2). Сигнал биений фильтровался, усиливался и фазово-когерентно стабилизировался на частоте 4 МГц по сигналу кварцевого генератора. Полоса обратной связи системы стабилизации частоты ограничивалась резонансами пьезокерамики, управляющей длиной резонатора Er^{3+} -лазера, и составляла ~ 50 кГц.

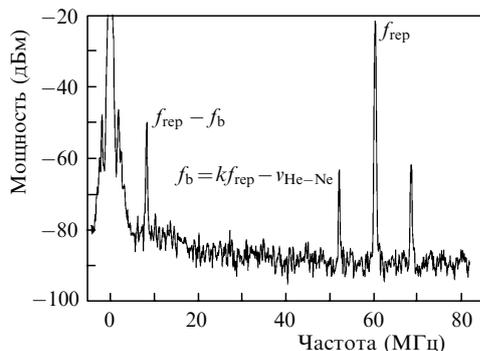


Рис.2. Радиочастотный спектр биений частоты излучения He-Ne -гетеродина и частоты ближайшей к ней компоненты гребенки среднего ИК диапазона (полоса спектроанализатора 100 кГц).

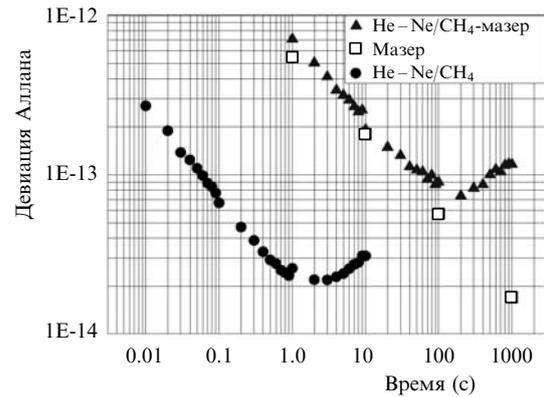


Рис.3. Девияция Аллана радиочастотного сигнала оптических часов относительно мазера (\blacktriangle), собственной частоты мазера (\blacksquare) и собственной частоты He-Ne/CH_4 -ОСЧ (\bullet).

В режиме стабилизации радиочастоты $f_{\text{грп}}$ напрямую выражается через оптическую частоту $\nu_{\text{He-Ne}}$: $f_{\text{грп}} = (\nu_{\text{He-Ne}} + 4 \text{ МГц})/k$, и поскольку частота $\nu_{\text{He-Ne}}$ жестко связана с частотой He-Ne/CH_4 -стандарта ν_{st} , то и $f_{\text{грп}}$ оказывается стабилизированной по He-Ne/CH_4 -ОСЧ. Из выражения для $f_{\text{грп}}$ можно, зная k (в нашем случае $k = 1415468$) и измеряя $f_{\text{грп}}$ по радиочастотному стандарту, определять абсолютную частоту He-Ne -лазера ($\nu_{\text{He-Ne}}$) с точностью, которую обеспечивает этот стандарт.

Сигнал оптических часов на частоте $f_{\text{грп}}$ или на частотах ее гармоник детектировался независимо с волоконного выхода фемтосекундного Er^{3+} -генератора. Стабильность частоты $f_{\text{грп}}$ выходного радиочастотного сигнала оптических часов определялась сравнением его с сигналом водородного мазера ЧП-1006. Сигнал мазера и сигнал оптических часов приводились к разностной частоте, составлявшей ~ 28 кГц. Нестабильность этой разностной частоты показана на рис.3 треугольниками. Квадраты соответствуют внутренней нестабильности мазера. Для сравнения приведен результат сличения частот двух He-Ne/CH_4 -ОСЧ (кружки) [1], один из которых использовался в данном эксперименте. Из приведенных данных видно, что на временах усреднения $\tau \leq 30$ с нестабильность метановых оптических часов определяется нестабильностью частоты Н-мазера и составляет $6 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$. На больших временах усреднения преобладают дрейфы частоты использовавшегося в эксперименте He-Ne/CH_4 -ОСЧ.

Авторы выражают благодарность В.Н.Сорокину за предоставление водородного мазера. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 06-02-16999), Программы Президиума РАН «Фемтосекундная оптика и новые оптические материалы», Программы ОФН РАН «Спектроскопия и квантовые стандарты частоты».

- Gubin M.A., Shelkovnikov A.S., Kovalchuk E.V., Krylova D.D., et al., in *Proc. 1999 Joint Meeting EFTF/IEEE IFCS* (Besancon, France, 1999, p. 710).
- Холл Дж.Л., Хэнш Т.В. *УФН*, **176** (12), 1343 (2006).
- Zimmermann M., Gohle C., Holzwarth R., Udem T., Hänsch T.W. *Opt. Lett.*, **29**, 310 (2004).
- Foreman S., Marian A., Ye J., Petrukhin E., Gubin M., Mücke O., Wong F., Ippen E., Kaertner F. *Opt. Lett.*, **30**, 570 (2005).
- Washburn B.R., Diddams S.A., Newbury N.R., Nicholson J.W., Yan M.F., Jorgensen C.G. *Opt. Lett.*, **29**, 250 (2004).
- Gubin M.A., Kireev A.N., Tausenev A.V., Konyashchenko A.V., Kryukov P.G., Tyurikov D.A., Shelkovnikov A.S. *Laser Phys.*, **17**, 1286 (2007).