

07;12

## Стабилизация спектра излучения фемтосекундного титан-сапфирового лазера

© А.В. Герасимов, В.П. Капралов, А.А. Шимко

НИИ лазерных исследований Санкт-Петербургского государственного университета, С.-Петербург, Петродворец

В окончательной редакции 8 ноября 2006 г.

Предложена и реализована схема стабилизации частоты биений взаимодействующих продольных мод излучения фемтосекундного титан-сапфирового лазера „Фемос-1“. Экспериментально исследуются стабильность и спектр частот биений мод. Кратковременная нестабильность частот биений не превышает  $4.8 \cdot 10^{-8}$  ( $\tau = 10$  s) за период 10 min. Ширина линии излучения лазера в режиме самосинхронизации мод  $\leq 3$  Hz. Ширина спектра 20 nm. Представлены экспериментальные результаты.

PACS: 42.55.Rz

Лазеры с синхронизованными модами имеют широкий спектр излучения эквидистантных мод и узкую линию излучения каждой моды. При этом устанавливается прямая фазовая когерентная связь в любой части оптического спектра. Реализуется шкала частот (длин волн), в которой значительно уменьшаются погрешности при передаче абсолютного значения частоты в пределах оптического диапазона. При этом создается реальная возможность когерентно связать все существующие эталоны оптического и радиодиапазона без потери точности при передаче размера. Синхронизация излучения лазеров с частотой квантовых стандартов необходима для создания синтезаторов оптического диапазона.

Известны два метода для построения функциональной структурной схемы синтезаторов:

1. Метод гармоник использует условие, при котором оптическая частота является гармоникой сигнала квантового стандарта микроволнового диапазона.

2. Разностный метод основан на использовании условия, при котором  $n$ -я гармоника разностной частоты между модами лазера совпадает с гармоникой сигнала квантового стандарта микроволнового диапазона.

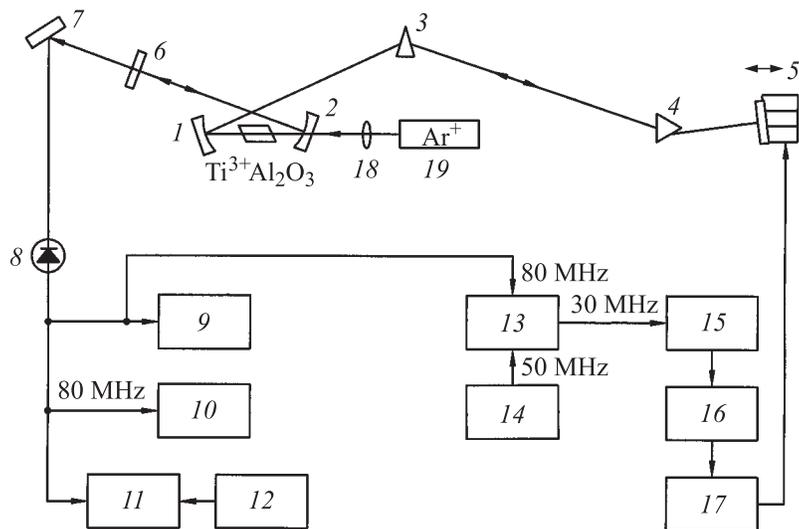
Разностный метод был реализован в работе [1], в которой осуществлена синхронизация частоты биений продольных мод гелий-неонового лазера, работающего в двухчастотном режиме  $\Delta f = 230$  МГц с частотой высокостабильного радиотехнического генератора.

В работе [2] сообщалось о синхронизации излучения гелий-неонового лазера ( $\Delta f = 510$  МГц) с квантовым стандартом частоты микроволнового диапазона. Для стабилизации использован дискриминатор атомно-лучевого радиоспектроскопа на пучке атомов  $^{133}\text{Cs}$ . Частота эталонного перехода равна 9192 МГц. При этом кратковременная нестабильность частотного излучения лазера не превышала  $1.5 \cdot 10^{-11}$  ( $\tau = 10$  с) за 1 мин, а долговременная стабильность  $0.8 \cdot 10^{10}$  за 4 ч. Однако эти системы синхронизации работали в узком диапазоне оптического спектра.

В данной работе экспериментально исследуется система стабилизации спектра излучения фемтосекундного титан-сапфирового лазера „Фемос-1“. Оптико-механическая система резонатора лазера построена по широко известной схеме фемтосекундного лазера на кристалле титан-сапфира ( $\text{Ti}^{3+}\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Лазер изготовлен в ЗАО „Техноскан“ г. Новосибирск. Физико-механические подробности освещены в обзоре [3]. Установка позволила измерить ширину линии генерации лазера, спектр биений взаимодействующих продольных мод и характер изменения во времени этих параметров. Исследовались два режима работы лазера: режим самосинхронизации взаимодействующих мод и дополнительный режим с активной системой стабилизации частоты биений мод. Предложена структурная схема системы стабилизации и представлены экспериментальные результаты.

**Экспериментальная установка.** В основу работы лазера в режиме самосинхронизации продольных мод положен метод самосинхронизации мод — метод наведенной Керровской линзы. Метод основан на изменении пространственного профиля луча в результате самофокусировки, вызванной эффектом Керра в кристалле титан-сапфира. Для компенсации эффектов, связанных с дисперсным распыванием импульсов внутри резонатора лазера установлен призмный компрессор.

Схема, показанная на рис. 1, поясняет ход лучей в резонаторе лазера. Излучение системы, образованной сферическими зеркалами  $R = 80$  мм,



**Рис. 1.** Функциональная схема фемтосекундного титан-сапфирового лазера с блоками измерения и стабилизации его спектра: 1, 2 — сферические зеркала, 3, 4 — призмы, 5–7 — плоские зеркала, 8 — фотоприемник ЛФД-2 с предварительным усилителем, 9 — осциллограф С1-91, 10 — электронно-счетный частотомер ЧЗ-34, 11 — анализатор спектра СКЧ-56, 12 — синтезатор частот Ч6-31, 13 — смеситель частот, 14 — электронно-счетный частотомер ЧЗ-38, 15 — усилитель промежуточной частоты, 16 — частотный детектор, 17 — усилитель постоянного тока, 18 — линза, 19 — аргоновый лазер.

проходит последовательно призмы 3, 4. После прохождения призмы 4 луч отражается от зеркала 5, укрепленного на пьезокерамике КП-1. Плоское зеркало 6 является выходным. Коэффициент пропускания зеркала 3–5%. Вспомогательное зеркало 7 направляет излучение лазера мощностью 150 mW на фотоприемник 8. Фотодиод ЛФД-2 размещен в одном корпусе с предварительным усилителем. Четырехкаскадный транзисторный усилитель имеет коэффициент усиления, равный 10, и полосу усиления 150 MHz.

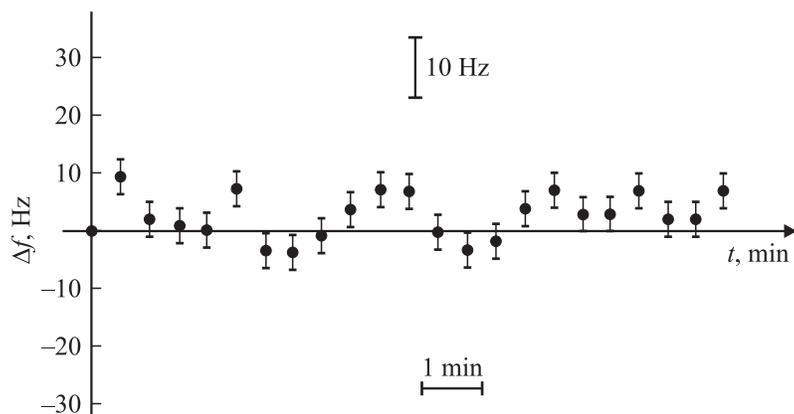
Титан-сапфировый кристалл с брьюстеровскими гранями крепится в охлаждаемом держателе внутри резонатора, образованного зеркалами 1 и 2. Излучение аргонового лазера „Инверсия“ 19 мощностью 5 W

фокусируется линзой 18 на кристалл. Плоские зеркала 5, 6 имеют коэффициент отражения 99,9% в диапазоне длин волн 700–900 нм с максимумом на 800 нм. В режиме самосинхронизации продольных мод фемтосекундный лазер излучал последовательность импульсов длительностью 70 фемтосекунд с частотой повторения 80 МГц. Средняя мощность равна 150 мВт. Ширина спектра выходного излучения достигала 20 нм в диапазоне длин волн 790–810 нм.

Измерительный блок состоит из группы радиоизмерительных приборов: осциллограф С1-91 9 подключен к нагрузке фотоприемника и регистрирует форму сигнала биений мод на частоте 80 МГц при настройке лазера. Электронный счетный частотомер ЧЗ-34 10 измеряет частоту межмодовых биений для получения массива значений для статической обработки результатов измерений. Анализатор спектра СК4-56 11 и синтезатор частот Ч6-31 12 преобразуют частоту сигнала биений мод 80 МГц в более низкую 20 кГц. Это позволяет использовать узкополосный фильтр прибора на этой частоте. Минимальная полоса пропускания на этой частоте равна 3 Гц. Функциональная структурная схема системы автоматической настройки резонатора лазера на среднее значение разброса частот межмодовых биений показана на рис. 1. Сигнал межмодовых биений на частоте 80 МГц амплитудой 60 мВ с фотоприемника 8 направляется в смеситель частот 13. Сигнал гетеродина на частоте 50 МГц с синтезатора частот электронно-счетного частотомера ЧЗ-38 14 подает на второй вход смесителя. Сигнал разности частот 30 МГц направляется в стандартный усилитель промежуточной частоты 15 с частотным детектором 16. Ширина полосы усиления равна 3 МГц. На выходе частотного детектора получается сигнал расстройки частот межмодовых биений по отношению к среднему значению. Сигнал расстройки с выхода частотного детектора с максимальной амплитудой  $\pm 1.5$  В через усилитель постоянного тока 17 управляет перемещением зеркала 5 через пьезокерамику КП-1.

В случае незначительных величин разброса средних значений частоты межмодовых биений при выключенной системе АПЧ может быть применена система частотно-фазовой автоподстройки.

Характер изменения частоты межмодовых биений фемтосекундного титан-сапфирового лазера „Фемос-1“ показан на рис. 2. Представлены частотно-временные характеристики изменений спектра при включенной системе автоматической настройки резонатора лазера. Мы наблюдали значительный разброс средних значений частоты межмодовых биений в режиме самосинхронизации продольных мод за период времени



**Рис. 2.** График изменений среднего значения частоты биений продольных мод фемтосекундного титан-сапфирового лазера с включенной системой активной стабилизации.

один месяц с выключенной системой автоматической настройки. При среднем значении  $f = 80\,699\,720$  Hz среднее квадратичное отклонение по частоте составляет величину  $\pm 210$  kHz. Это внутренняя сходимости результатов измерений. На графике показан режим с включенной системой автоматической настройки на среднее значение. Пассивную систему самосинхронизации мод корректирует активная автоматическая система. Сохраняется среднее значение частоты биений мод. Дисперсия среднего значения не превышает  $\pm 3$  Hz. Кратковременная нестабильность частоты биений продольных мод фемтосекундного титан-сапфирового лазера при включенной системе автоматической настройки не превышает величины  $4.8 \cdot 10^{-8}$  ( $\tau = 10$  s) за время 10 min. Наблюдаются незначительные колебания средних значений в пределах диапазона дисперсии. Эти колебания вызваны воздействием возмущающих факторов на резонатор титан-сапфирового лазера и изменением интенсивности мощности накачки. К возмущающим факторам относятся механические и акустические возмущения резонатора лазера, тепловой дрейф, флуктуации интенсивности или модовые флуктуации в накачивающем аргоновом лазере.

В заключение следует отметить, что на экспериментальной установке в режиме самосинхронизации продольных мод фемтосекундного

титан-сапфирового лазера на низких частотах мы наблюдали невозмущенную линию биений мод шириной  $\leq 3$  Hz и тон звуковой частоты при преобразовании биений мод в звуковой диапазон. Анализ спектра биений мод на низких частотах позволил обнаружить амплитудную и частотную модуляцию в излучении лазера. Амплитудную модуляцию вызывали колебания уровня мощности накачивающего аргонового лазера, а частотная модуляция обусловлена механическими и акустическими возмущениями резонатора титан-сапфирового лазера.

Авторы выражают благодарность С.В. Кукарину, оказанную при настройке лазера Фемос-1.

## Список литературы

- [1] *Chebotaev V.P., Klementyev V.M., Pilsin O.I.* // Appl. Phys. 1992. V. B54. P. 98.
- [2] *Булыгин А.С., Капралов В.П.* // Оптика и спектроскопия. 1977. Т. 42. В. 1. С. 154–160.
- [3] *Крюков П.Г.* // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 2. С. 95–119.