

ОПТИЧЕСКИЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ

Стабилизация фемтосекундного стандарта частоты с использованием интерферометра Майкельсона*

Е.В.Бакланов, А.К.Дмитриев

Предложен оптический стандарт частоты на основе фемтосекундного лазера, для контроля сдвига частотной гребенки которого используется интерферометр Майкельсона.

Ключевые слова: квантовая метрология, фемтосекундный лазер, оптический синтезатор частот, интерферометр Майкельсона.

1. Введение

В настоящее время во многих стандартах частоты используется фемтосекундный лазер, который в режиме синхронизации мод излучает периодическую последовательность коротких импульсов. Поскольку частота следования импульсов задается эталонным СВЧ генератором, то оптические частоты лазера оказываются строго прокалиброванными в единицах этой частоты. Большое число эквидистантных мод лазера позволяет перекрыть диапазон частот от микроволнового до видимого. Это означает, что по существу имеется оптическая линейка для абсолютного измерения частот в указанном диапазоне. Одна из главных проблем при реализации такой линейки – устранение общего для всех частот сдвига, для обозначения которого часто используется аббревиатура CEO (carrier-envelope offset). Поэтому для точного задания сетки оптических частот необходимо стабилизировать частоту следования импульсов и исключить частотный сдвиг гребенки CEO.

Одной из главных задач при создании фемтосекундного стандарта частоты является фазовая привязка частоты эталонного СВЧ генератора к гребенке частот фемтосекундного лазера. Обычно для этого применяется оптический синтезатор частот с использованием $f-2f$ -интерферометра [1,2]. При этом непосредственно стабилизируются два параметра – частота следования импульсов и CEO. Другой метод управления гребенкой частот основан на использовании внешнего высокочастотного

резонатора [3,4]. В данном случае частота следования импульсов и CEO стабилизируются одновременно. При этом достигается высокая кратковременная стабильность, но не определяются абсолютные значения частот лазера.

В наших работах [5,6] разработан метод контроля сдвига частотной гребенки с использованием внешнего высокочастотного интерферометра, где CEO регистрируется с помощью интерференционной картины. В настоящей статье для контроля сдвига частотной гребенки используется интерферометр Майкельсона, который позволяет зафиксировать разность фаз между импульсами и, следовательно, определить CEO. После его устранения необходимо стабилизировать только один параметр – частоту следования импульсов. В этом случае реализация стандарта частоты может оказаться существенно проще, чем в существующих фемтосекундных стандартах.

2. Устранение CEO

Излучение оптического стандарта частоты на основе фемтосекундного лазера представляет собой периодическую последовательность импульсов, спектр которой состоит из набора частот

$$\omega_m = m\Omega + \text{CEO}, \quad (1)$$

где m – целые положительные числа; Ω – межмодовая частота, которая стабилизируется с помощью СВЧ эталона. Возникновение сдвига CEO связано с тем, что фазовая и групповая скорости импульса при обходе резонатора лазера различны. Групповая скорость определяется частотой следования импульсов Ω , а фазовая – дисперсионными элементами в резонаторе лазера. Поэтому в общем случае периодические импульсы излучения лазера отличаются друг от друга, т. е. поле излучения не является строго периодической функцией. Если пронумеровать последовательность излучаемых импульсов индексом i , то форма каждого импульса сохранится, а несущая частота приобретет фазовый сдвиг φ_i относительно вершины импульса, пропорциональный CEO. При измерении сигнала от интерференции двух импульсов с помощью интерферометра Майкельсона на детекторе возникает член, пропорциональный

* Доложена на Пятом российско-китайском симпозиуме по лазерной физике и фотонике (RCWLP&P, Новосибирск, 26–30 августа 2015 г.).

Е.В.Бакланов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева 13/3; Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: baklanov.ev@gmail.com

А.К.Дмитриев. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева 13/3; Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073 Новосибирск, просп. Маркса, 20

Поступила в редакцию 7 декабря 2015 г.

$$\cos(\Delta\varphi)\exp(-\Delta t^2/\tau^2), \quad (2)$$

где τ – длительность импульса; $\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_k$ – разность фаз импульсов; Δt – временная задержка между импульсами, которая определяется интерферометром; для простоты форма импульсов выбрана гауссовой. Для регистрации сигнала можно использовать схему, аналогичную схеме детектора Хэнша–Койлауда [7], которая широко применяется в поляризационных методах стабилизации частоты лазеров, обладающих очень высокой чувствительностью [8].

Отметим, что при СЕО = 0 все импульсы одинаковы, а следовательно, $\Delta\varphi = 0$. Поэтому устранение СЕО производится следующим образом. Сначала интерферометр настраивают на максимум сигнала, при котором $\Delta t = 0$. Затем управляют дисперсией в резонаторе лазера, чтобы изменить фазовую скорость импульсов и получить $\Delta\varphi = 0$. Обычно это делают с помощью тока накачки лазера.

3. Схема стандарта

Рассмотрим оптический стандарт частоты, в котором сдвиг СЕО устраняется с помощью изложенного выше метода. На рис.1 представлена упрощенная схема установки. Схема включает в себя два кольца регулирования. Первое кольцо является быстрым и поддерживает частоту следования импульсов фемтосекундного лазера постоянной. Оно работает следующим образом. Излучение фемтосекундного лазера 1, отражаясь от полупрозрачного зеркала 2, поступает на высокочастотный фотодетектор 3, где выделяются межмодовые биения лазера, а затем идет на один из входов блока фазовой привязки частоты (ФАП) 4. На другой вход этого блока поступает сигнал от синтезатора 5, частота которого привязана к СВЧ стандарту 6. Сигнал ошибки с выхода ФАП подается на пьезокерамику лазера 1, которая управляет длиной его резонатора, а значит, и частотой следования импульсов лазера.

Второе кольцо регулирования является медленным по сравнению с первым, оно устраняет СЕО. Часть излучения проходит через делительное зеркало 2 на интерферометр Майкельсона 7, разность плеч которого сканируется вблизи заданного значения на величину порядка длины волны с помощью генератора пилообразного напряжения 8. Сигнал биений интерферометра регистрируется фотодетектором 9, а затем обрабатывается на компьютере 10. Кольцо обратной связи замыкается цифро-аналоговым преобразователем 11 и блоком питания 12, который управляет дисперсией резонатора лазера и, следовательно, СЕО.

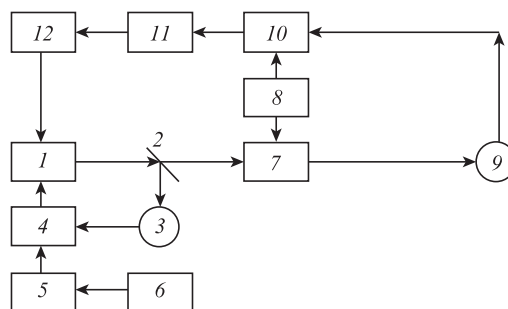


Рис.1. Схема стабилизации гребенки частот фемтосекундного лазера:

1 – фемтосекундный лазер; 2 – делительное зеркало; 3 – широкополосный фотодетектор; 4 – блок фазовой привязки частоты; 5 – синтезатор частоты; 6 – СВЧ стандарт частоты; 7 – интерферометр Майкельсона; 8 – генератор пилообразного напряжения; 9 – фотодетектор; 10 – компьютер; 11 – цифро-аналоговый преобразователь; 12 – блок питания лазера.

4. Заключение

В настоящее время для прецизионного измерения частот используется фемтосекундный лазер с $f-2f$ -интерферометром [1,2]. Однако для работы этого интерферометра необходимо иметь ширину спектра более октавы. Вместе с тем существует много коммерческих наносекундных и пикосекундных лазеров с самосинхронизацией мод, в которых из-за малой ширины спектра не может использоваться $f-2f$ -интерферометр. Предложенная нами простая схема оптического стандарта частоты пригодна для различных ширин спектра излучения лазера, что позволяет распространить рассмотренный метод на лазеры с самосинхронизацией мод нано- и пикосекундного диапазонов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 15-02-02557, 14-02-00408) и Министерства образования и науки РФ в рамках проектной части государственного задания (код проекта 1316).

- Holzwarth R., Udem Th., Hänsch T.W., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 2264 (2000).
- Udem Th., Holzwarth R., Hänsch T.W. *Nature*, **416**, 233 (2002).
- Jones R.J., Dies J.-C., Jaspars J. *Phys. Rev. Lett.*, **86**, 3288 (2001).
- Jones R.J., Ido T., Loftus T., Boyd M., Ludlow A., Holman K., Thorpe M., Moll K., Ye J. *Laser Phys.*, **15**, 1010 (2005).
- Бакланов Е.В., Дмитриев А.К. *Квантовая электроника*, **32**, 925 (2002).
- Баснак Д.В., Бикмухаметов К.А., Дмитриев А.К., Дычков А.С., Кузнецов С.А., Луговой А.А., Мицзита П. *Квантовая электроника*, **42**, 71 (2012).
- Hänsch T.W., Couillaud V. *Opt. Commun.*, **35**, 441 (1980).
- Риле Ф. *Стандарты частоты* (М.: Физматлит, 2009).

ПОПРАВКА

П.А.Бохан, Дм.Э.Закревский, М.А.Лаврухин, Н.А.Лябин, А.Д.Чурсин. Возбуждение и релаксация метастабильных состояний атомов в активной среде импульсно-периодического лазера на парах меди («Квантовая электроника», 2016, т. 46, № 2, с. 100–105).

В статье допущены следующие опечатки: на рис.3,а и 4,а в обозначениях вертикальных осей вместо I (200 А) должно стоять I (20 А).