

К. А. Бикмухаметов, А. К. Дмитриев, С. В. Чепуров

(Новосибирск)

ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ И ДЛИН С ПОМОЩЬЮ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА

Предложен новый метод измерения оптических частот и длин с относительной погрешностью 10^{-13} при помощи высокостабильного фемтосекундного лазера и интерферометра Фабри – Перо.

Введение. Фемтосекундный лазер (ФСЛ), работающий в режиме самосинхронизации мод, генерирует одновременно множество $\sim (10^5 - 10^6)$ эквидистантно расположенных оптических частот с дискретностью 0,01–1 ГГц в частотном диапазоне до сотен терагерц [1]. Стабилизация модовой структуры ФСЛ может быть осуществлена различными способами: путем привязки двух мод ФСЛ одновременно к первой и второй гармоникам излучения лазера [2], стабилизацией межмодовых биений по микроволновому или оптическому стандарту частоты и привязкой одной из мод ФСЛ к частоте оптического стандарта [3] или измерением сдвига гребенки частот ФСЛ [4]. Следует отметить, что для контроля сдвига гребенки необходимо иметь спектр излучения, превышающий октаву. Таким образом, синтезатор на основе стабилизированного фемтосекундного лазера может использоваться для измерения частот от радио- до оптического диапазона с погрешностью, определяемой стандартами частоты.

Для измерения абсолютных длин с помощью ФСЛ необходимо выделение частотного сдвига гребенки ФСЛ, что предполагает наличие спектра, превышающего октаву [5].

В представленной работе предложен метод, который позволяет проводить измерения оптических частот, а также длины базы интерферометра Фабри – Перо (ИФП) с относительной погрешностью $\sim 10^{-13}$ с помощью фемтосекундного лазера, когда спектр его излучения может быть существенно меньше октавы.

Методика измерения. Одними из наиболее доступных и универсальных частотных реперов в оптическом диапазоне являются полосы пропускания ИФП. В отсутствие дисперсии зеркал полосы пропускания расположены эквидистантно, а их частоты прямо пропорциональны целому числу k :

$$\nu_i = k\Delta_i. \quad (1)$$

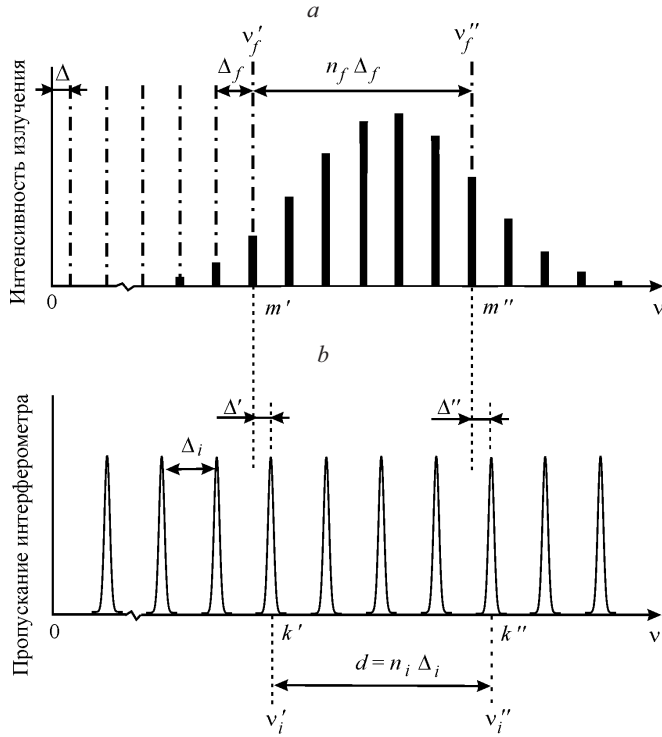


Рис. 1. Методика измерения оптических частот с помощью ФСЛ: спектр излучения фемтосекундного лазера (сплошные линии – структура излучения ФСЛ с межмодовым интервалом Δ_f ; штрихпунктирные – виртуальные значения частот ФСЛ) (а); пропускание интерферометра Фабри – Перо ($\Delta_i = c/2l$ – область дисперсии интерферометра; $\nu_i = k\Delta_i$ – центр полосы пропускания ИФП; $d = n_i\Delta_i$ – ширина полосы пропускания ИФП) (б)

Область дисперсии интерферометра Δ_i равна разностной частоте между одночастотными лазерами, настроенными на максимумы соседних полос ИФП. Измерение длины волны одного из лазеров позволяет найти предварительное значение его частоты ($\nu_i = c/\lambda_i$), погрешность которой соответствует точности измеренной длины волны. Используя выражение (1), можно найти значение целого числа k для соответствующей полосы интерферометра. Дрейф длины интерферометра возможно компенсировать за счет привязки одной из его полос к оптическому стандарту частоты.

При заданной абсолютной погрешности настройки одночастотного лазера на максимум полосы пропускания ИФП точность измерения области дисперсии интерферометра Δ_i будет пропорциональна частотному интервалу $\nu_i'' - \nu_i' = n_i \Delta_i$ (рис. 1). Величина разности частот $\nu_i'' - \nu_i'$ ограничена полосой пропускания измеряющего ее фотодетектора. Использование же гребенки ФСЛ позволяет на несколько порядков увеличить измеряемый интервал и соответственно повысить точность измерений Δ_i .

Спектр излучения ФСЛ состоит из набора эквидистантно расположенных частот с интервалом Δ_f и общим сдвигом гребенки частот Δ (см. рис. 1), так что значение частоты выбранного спектрального компонента излучения

$$\nu_f = m\Delta_f + \Delta, \quad (2)$$

где m – целое число. Межмодовую частоту лазера Δ_f легко измерить и привязать к стандарту частоты. Однако величина сдвига гребенки частот Δ не может быть найдена из прямых измерений, если спектр излучения ФСЛ меньше октавы.

Наложение сетки частот ФСЛ с известным межмодовым интервалом Δ_f на гребенку полос пропускания ИФП позволяет прокалибровать с высокой точностью его межмодовый интервал Δ_i . Таким образом, устанавливаются (уточняются на несколько порядков) как абсолютные значения центров полос пропускания интерферометра ν_i , которые могут служить абсолютными частотными реперами, так и его длина $l = c/2\Delta_i$.

Процедура измерений осуществляется следующим образом. Два одночастотных лазера настраиваются на полосы ИФП $\nu'_i = k' \Delta_i$ и $\nu''_i = k'' \Delta_i$. Используя λ -метр и предварительно измеренное значение Δ_i , можно найти k' и k'' . С одной стороны, разность частот определяется через область дисперсии ИФП:

$$\nu''_i - \nu'_i = (k'' - k') \Delta_i, \quad (3)$$

а с другой – через величину межмодовых биений ФСЛ Δ_f и дефицита частот Δ' и Δ'' :

$$\nu'' - \nu' = n_f \Delta_f + (\Delta'' - \Delta'). \quad (4)$$

Приравнивая правые части выражений (3) и (4), находим уточненное значение области дисперсии ИФП

$$\Delta_i = \frac{n_f \Delta_f + \Delta'' - \Delta'}{n_i}, \quad (5)$$

где разность номеров двух выделенных мод ИФП $n_i = k'' - k'$ была ранее определена, а Δ_i предварительно измерена. Величина межмодовых биений Δ_f задается радиочастотным стандартом, а дефицита частот Δ'' и Δ' измеряются с высокой точностью. Правая часть выражения (5) представляет собой дискретный набор частот, который при сопоставлении с предварительно измеренной величиной Δ_i позволяет на несколько порядков уточнить значение области дисперсии ИФП. В этом случае максимумы полос пропускания ИФП можно использовать как частотные реперы высокой точности.

Из выражения (5) находим точное значение длины базы интерферометра

$$l = \frac{cn_i}{2(n_f \Delta_f + \Delta'' - \Delta')}. \quad (6)$$

Вместе с тем использование ИФП позволяет найти величину смещения гребенки мод Δ . Из пары равенств $\nu'_f = \nu'_i - \Delta'$ и $\nu'_f = m' \Delta_f + \Delta$ (см. рис. 1), принимая во внимание, что $0 < \Delta < \Delta_f$, определим сдвиг гребенки частот ФСЛ

$$\Delta = \nu'_i - \Delta' - m' \Delta_f. \quad (7)$$

Величину Δ можно найти также из другой пары равенств: $\nu_f'' = \nu_i'' - \Delta''$ и $\nu_f'' = m'' \Delta_f + \Delta$, откуда

$$\Delta = \nu_i'' - \Delta'' - m'' \Delta_f. \quad (8)$$

Таким образом, значения выбранных мод ФСЛ можно использовать в качестве частотных реперов с применением стандартной процедуры, как и в случае, когда ширина спектра ФСЛ превышает октаву [4].

Схема установки. Предложенный метод реализуется следующим образом (рис. 2). Межмодовые биения Δ_f фемтосекундного лазера 7 выделяются на фотодетекторе 6, откуда сигнал поступает на вход блока фазовой привязки частоты 1. Опорная частота F задается синтезатором частоты 2, стабильность которого определяется радиочастотным стандартом 3. Спектральный диапазон гребенки частот лазера 7 меньше октавы, и значения оптических частот компонентов ν_f не определены. Однако смещение излучений лазера 7 и оптического стандарта частоты 12 позволяет выделить на фотодетекторе 8 разностную частоту $\nu_i' - \nu_f'$ между частотой лазерного стандарта 12 и ближайшей к ней модой фемтосекундного лазера. Опорная частота Δ' поступает от синтезатора 5 на блок фазовой привязки 4, так что $\Delta' = \nu_i' - \nu_f'$. Следовательно, по одному кольцу поддерживается постоянное значение межмодовой частоты Δ_f , а по другому осуществляется стабилизация всей гребенки на частотной шкале.

Для стабилизации длины интерферометра 13 одна из его полос пропускания привязывается к частоте ν_i' излучения лазера 12. При этом сигнал ошибки выделяется на фотодетекторе 14 и стабилизация длины интерферометра осуществляется с помощью блока автоматической подстройки частоты 11. Для предварительного измерения межмодовой частоты Δ_i излучение одночастотного перестраиваемого лазера 16 привязывается к моде, соседней по отношению к ν_i' , и измеряется с помощью λ -метра 17. Сигнал ошибки выделяется фотодетектором 18, и стабилизация лазера 16 осуществляется бло-

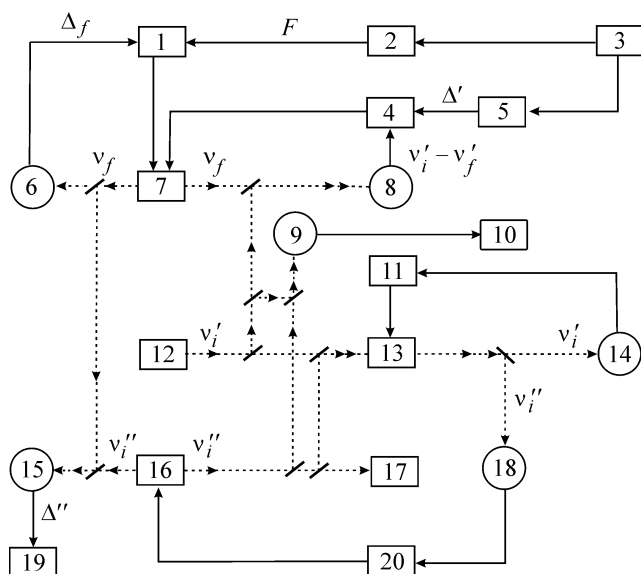


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

ком автоматической подстройки частоты 20. Излучения лазеров 12 и 16 имеют скрещенные линейные поляризации, что позволяет разделить их на фотодетекторах 14 и 18. Разность частот между лазерами, равная области дисперсии интерферометра Δ_i , выделяется фотодетектором 9 и регистрируется частотомером 10.

Уточнение величины Δ_i происходит за счет отстройки частоты лазера 16 на возможно более далекую от ν_i' моду интерферометра. Разность частот между лазером 16 и ближайшей модой фемтосекундного лазера 7 ($\Delta'' = \nu_i'' - \nu_f''$) выделяется фотодетектором 15 и регистрируется частотомером 19.

Оценка погрешности измерений. Для достоверного нахождения номера моды k интерферометра, как видно из выражения (1), необходимо, чтобы относительные погрешности измерения соответствующего максимума полосы пропускания ν_i и область дисперсии Δ_i были существенно меньше величины $1/k = \Delta_i/\nu_i$. Отсюда следует, что абсолютная погрешность измеренного значения области дисперсии $\delta\Delta_i$ должна удовлетворять условию

$$\delta\Delta_i \ll \Delta_i^2/\nu_i, \quad (9)$$

а погрешность измерения абсолютного значения полосы пропускания ИФП – условию

$$\delta\nu_i \ll \Delta_i. \quad (10)$$

Выполнение неравенств (9) и (10) зависит как от точности измерения частоты лазерного стандарта, так и от погрешности совмещения полосы ИФП с частотой излучения лазера.

Международным бюро мер и весов (BIPM) рекомендовано использовать в качестве стандартов частоты и длины волны множество лазеров от видимого до ИК-диапазонов [6], относительная воспроизводимость частоты которых лежит в диапазоне $10^{-10} - 10^{-13}$ или в абсолютных величинах от 10 до 10^5 Гц, что существенно меньше величины Δ_i для ИФП с длинами баз до 100 м. Точность же настройки полосы пропускания ИФП на частоту излучения лазерного стандарта ν_i , очевидно, также гарантирует выполнение условия (10).

Вместе с тем погрешность измерения области дисперсии

$$\delta\Delta_i = \varepsilon d, \quad (11)$$

где ε – относительная погрешность привязки частоты излучения лазера к центру полосы пропускания ИФП с шириной [7]

$$d = \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}} \Delta_i. \quad (12)$$

Здесь R – коэффициент отражения зеркал ИФП. Используя выражения (9), (10) и (12), покажем, что для относительной погрешности настройки на центр полосы ИФП в единицах ширины полосы пропускания d должно выполняться условие

$$\varepsilon \ll \frac{\pi\sqrt{R}\Delta_i}{(1-R)\nu_i}. \quad (13)$$

Видно, что неравенство (13), а следовательно, и (9) легче выполнить для высокочастотного интерферометра с короткой базой (большой Δ_i) и при использовании лазерного стандарта с меньшим значением частоты излучения ν'_i . При коэффициенте отражения зеркал $R = 0,999$, длине базы ИФП $l = 0,5$ м, частоте моды интерферометра $\nu_i = 10^{14}$ получим $\varepsilon \ll 10^{-2}$, что несложно реализовать с помощью современной техники.

Достоверное определение номера моды k интерферометра позволяет также идентифицировать номера мод m фемтосекундного лазера.

Погрешность измерения частот полос пропускания интерферометра ν_i находится из выражений (1) и (5) и при условии $\Delta', \Delta'' \ll n_f \Delta_f$:

$$\frac{\delta \nu_i}{\nu_i} = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta \Delta_f}{\Delta_f}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta'}{n_f \Delta_f}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta''}{n_f \Delta_f}\right)^2}, \quad (14)$$

где первый член определяется используемым стандартом частоты и его значение может не превышать 10^{-13} . Погрешности определения дефицитов частот Δ' и Δ'' связаны, прежде всего, с точностью настройки лазеров на центры полос пропускания ИФП. Используя выражения (11) и (12), получим

$$\delta \Delta' \approx \delta \Delta'' \approx \frac{1-R}{\pi \sqrt{R}} \Delta_i \varepsilon, \quad (15)$$

и при заданных параметрах ИФП, и относительной погрешности привязки частоты излучения лазера $\varepsilon = 10^{-4}$ величины $\delta \Delta'$ и $\delta \Delta''$ будут порядка 10 Гц. При спектральной ширине ФСЛ $n_f \Delta_f \approx 10^{14}$ Гц относительные доли погрешности из-за второго и третьего членов (14) будут также равны 10^{-13} .

Как видно из рис. 1, $\nu'_f = \nu'_i - \Delta'$, откуда следует, что погрешность определения частоты выделенной моды ν'_f будет иметь вид

$$\frac{\delta \nu'_f}{\nu_f} \approx \pm \sqrt{\left(\frac{\delta \nu_i}{\nu_f}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta'}{\nu_f}\right)^2}. \quad (16)$$

Поскольку $\nu_f \approx \nu_i$, первый член в выражении (16) находится из (14) и при указанных выше параметрах будет порядка 10^{-13} и второй член также не превышает этой величины.

Погрешность измерения длины ИФП определяется из выражения (6). С учетом того, что $\Delta', \Delta'' \ll n_f \Delta_f$, отношение

$$\frac{\delta l}{l} = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta \Delta_f}{\Delta_f}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta'}{n_f \Delta_f}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta''}{n_f \Delta_f}\right)^2}. \quad (17)$$

Видно, что правые части выражений (14) и (17) совпадают, откуда следует

$$\frac{\delta \nu_i}{\nu_i} = \frac{\delta l}{l}. \quad (18)$$

Таким образом, предложенный метод измерения частот оптического диапазона и длины ИФП позволяет достичь погрешностей измерения на уровне 10^{-13} , когда ширина спектра излучения ФСЛ меньше октавы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багаев С. Н., Захарьяш В. Ф., Клементьев В. М. и др. Стабилизация частоты следования фемтосекундных импульсов Al_2O_3 : Ti-лазера // Квантовая электрон. 1997. **24**, № 4. С. 327.
2. Ye J., Ma L. S., Hall J. L. Molecular iodine clock // Phys. Rev. Lett. 2001. **87**, N 27. P. 270801-1.
3. Bagayev S. N., Chepurov S. V., Klementyev V. M. et al. A femtosecond self-mode-locked Ti : sapphire laser with high stability of pulse-repetition frequency and its applications // Appl. Phys. 2000. **V70**, N 3. P. 375.
4. Cundiff S. T., Ye J., Hall J. Optical frequency synthesis based on mode-locked lasers // Rev. Sci. Instr. 2001. **72**, N 10. P. 3749.
5. Дмитриев А. К., Бакланов Е. В. Абсолютное измерение длины с помощью фемтосекундного лазера // Квантовая электрон. 2002. **32**, № 10. С. 925.
6. Quinn T. J. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001) // Metrologia. 2003. **40**, N 2. P. 103.
7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.

*Институт лазерной физики СО РАН,
Сибирский государственный
научно-исследовательский институт метрологии,
E-mail: dak@laser.nsc.ru
tolstikov@cniim.siberia.net*

*Поступила в редакцию
13 апреля 2005 г.*