

# Измерение сдвига частотной гребенки фемтосекундного лазерного излучения интерференционным методом

Д.В.Баснак, К.А.Бикмухаметов, А.К.Дмитриев, А.С.Дычков,  
С.А.Кузнецов, А.А.Луговой, П.Мицзити

*Продемонстрирована возможность измерения сдвига частотной гребенки фемтосекундного лазерного излучения по смещению полос пропускания относительно их огибающей интерферометром Фабри–Перо со статистической погрешностью  $10^{-2}$  и систематическим сдвигом  $10^{-1}$ .*

**Ключевые слова:** фемтосекундный лазер, частотная гребенка, интерферометр, полоса пропускания.

## 1. Введение

Использование фемтосекундного лазера существенно упростило и повысило точность измерения оптических частот благодаря уширению спектра излучения лазера с самосинхронизацией мод свыше октавы. Смещение низкочастотного и высокочастотного крыльев спектра позволило определить частоту сдвига гребенки частот на абсолютной частотной шкале, создать так называемый  $f-2f$ -интерферометр [1–3]. Если межмодовая частота гребенки привязана к частоте микроволнового стандарта и измерен сдвиг гребенки относительно нулевой частоты, то весь ряд значений частотных компонент излучения фемтосекундного лазера становится известным с относительной погрешностью, определяемой стандартом частоты.

Использование комплекса, состоящего из стандарта частоты, фемтосекундного синтезатора и интерферометра, позволяет создать единый стандарт времени, частоты и длины [4, 5]. Вместе с тем была продемонстрирована возможность измерения сдвига гребенки частот фемтосекундного лазерного излучения с шириной спектра существенно менее октавы по сдвигу полос пропускания интерферометра относительно их огибающей [6]. Однако вопрос о возможных случайных и систематических погрешностях из-за различных факторов оставался открытым.

В настоящей работе рассмотрено влияние дисперсии и разбюстировки зеркал интерферометра на форму и сдвиг полос пропускания излучения фемтосекундного лазера.

**Д.В.Баснак, К.А.Бикмухаметов.** Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630092 Новосибирск, просп. К.Маркса, 20; e-mail: basnak@gmail.com, bi-kamil@yandex.ru  
**А.К.Дмитриев.** Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630092 Новосибирск, просп. К.Маркса, 20; Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: dak@fif.nstu.ru  
**А.С.Дычков, С.А.Кузнецов, А.А.Луговой.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: kuznet@laser.nsc.ru, lugovoy@laser.nsc.ru  
**P.Mitsziti.** Xinjiang University School of Physics, China; e-mail: Fmejid@xju.edu.cn

Поступила в редакцию 13 октября 2011 г.

## 2. Основные свойства излучения фемтосекундного лазера и интерферометра Фабри–Перо

Излучение лазера с самосинхронизацией мод можно представить в виде электромагнитных колебаний на частоте  $\omega_0$ , близкой к частоте, соответствующей максимуму линии усиления, с амплитудной модуляцией, период которой равен времени  $T$  обхода излучением резонатора лазера (для временного представления). В пространственном представлении расстояние между импульсами равно длине обхода резонатора излучением лазера.

Спектр излучения такого лазера представляет собой набор эквидистантно расположенных частот:

$$\nu_m = m f_{\text{греб}} + f_0, \quad (1)$$

где натуральное число  $m$  – номер моды;  $f_0$  – сдвиг гребенки частот лазера;  $f_{\text{греб}} = c/(2L)$  – частота повторения импульсов;  $c$  – скорость света;  $L$  – оптическая длина резонатора лазера.

С физической точки зрения сдвиг гребенки  $f_0$  связан с различием групповой и фазовой скоростей [1, 2]. С другой стороны, сдвиг гребенки  $f_0$  можно объяснить тем, что между колебанием на несущей частоте  $\omega_0$  и огибающей импульса в общем случае имеет место разность фаз. Если эта разность меняется от импульса к импульсу на величину  $\phi$ , то этому будет соответствовать смещение частотной гребенки лазера

$$f_0 = f_{\text{греб}} \frac{\phi}{2\pi}. \quad (2)$$

Вместе с тем, поскольку несущая частота  $\omega_0$  является одной из компонент спектра  $\nu_m$ , сдвиг гребенки частот  $f_0$  будет отсутствовать, как следует из (1), только тогда, когда отношение частоты несущей к частоте повторения будет целым числом.

Следует, однако, отметить, что в общем случае даже в отсутствие сдвига гребенки частот возможен сдвиг фазы несущей относительно огибающей, но этот сдвиг будет постоянным от импульса к импульсу.

В свободном режиме генерации фемтосекундного лазера происходят флуктуации оптической длины его резонатора  $L$ , что приводит к соответствующей нестабильности частоты повторения  $f_{\text{rep}}$ . Ряд факторов, например изменение мощности накачки и угловые отклонения зеркал резонатора, влияет на сдвиг гребенки частот  $f_0$ .

Дисперсия оптических элементов интерферометра Фабри–Перо в первом приближении может быть описана введением сдвига полос пропускания  $g$  [7, 8]:

$$\nu_m = \frac{(m + g)c}{2l}, \quad (3)$$

где сдвиг  $g$  выражен в единицах межмодового интервала  $c/(2l)$ ;  $l$  – расстояние между зеркалами интерферометра.

### 3. Пропускание излучения фемтосекундного лазера интерферометром Фабри–Перо с учетом дисперсии

Пропускание излучения фемтосекундного лазера интерферометром Фабри–Перо изучалось в ряде работ как теоретически, так и экспериментально (см., напр., [4–6]).

Для интерферометра Фабри–Перо в предположении, что ширина линии излучения каждой моды лазера много меньше ширины полосы пропускания интерферометра, интенсивность прошедшего через интерферометр Фабри–Перо излучения фемтосекундного лазера  $I_{\text{tr}}$  определяется коэффициентами пропускания  $K_m$  всех мод излучения лазера и интенсивностью его спектральных компонент:

$$I_{\text{tr}} = \sum_m I_m K_m, \quad K_m = \{1 + p \sin^2[\pi(m + q - g)z]\}^{-1}. \quad (4)$$

Здесь  $I_m$  – интенсивность падающей на интерферометр  $m$ -й моды фемтосекундного лазера;

$$q = \frac{f_0}{f_{\text{rep}}} \quad (5)$$

– относительный сдвиг гребенки частот лазера. По сравнению с выражением для идеального интерферометра [6] здесь введен дополнительный сдвиг гребенки полос пропускания излучения фемтосекундного лазера  $g$ , возникающий из-за дисперсии интерферометра. Параметр качества интерферометра определяется простым выражением:

$$p = 4R(1 - R)^{-2}, \quad (6)$$

где эффективный коэффициент отражения зеркал интерферометра  $R = (R_1 R_2)^{1/2}$  является средним геометрическим коэффициентов отражения зеркал  $R_1$  и  $R_2$ . Как и ранее [4–6], будем рассматривать задачу в отсутствие потерь.

Относительная длина  $z$  может изменяться за счет изменения оптических длин как интерферометра ( $l$ ), так и резонатора лазера ( $L$ ):

$$z = \frac{l}{L}. \quad (7)$$

Следует отметить, что при равенстве  $q$  и  $g$  выражение (4) становится равным аналогичному выражению в случае идеального интерферометра при отсутствии частотного сдвига гребенки, т.е. максимум огибающей полос пропускания излучения фемтосекундного лазера интерферометром Фабри–Перо в этом случае будет совпадать с максимумом одной из полос.

### 4. Схема экспериментальной установки

В эксперименте использовался фемтосекундный титан-сапфировый лазер, представляющий собой шестизеркальный кольцевой резонатор с chirпированными зеркалами. Длительность импульса составляла  $\sim 30$  фс, центральная длина волны – 0.82 мкм, выходная мощность – 550 мВт при мощности лазера накачки (Verdi V8, Coherent) 4.8 Вт, а частота повторения импульсов – около 495 МГц.

Излучение лазера, отражаясь от полупрозрачного зеркала, поступало на фотодиод ФД1, на котором выделялся сигнал межмодовых биений с частотой  $f_{\text{rep}}$  (рис.1). Отраженный от следующего полупрозрачного зеркала световой пучок поступал на интерферометр Фабри–Перо, который был образован плоскими полупрозрачными алюминидиевыми зеркалами с коэффициентами пропускания  $\sim 0.1$ . Длина интерферометра с помощью микровинта согласовывалась с оптической длиной резонатора лазера. Плавная перестройка длины интерферометра, необходимая для записи интерференционной картины, осуществлялась при подаче напряжения на пьезокерамический преобразователь от генератора пилообразного напряжения (на рис.1 не показан). Пространство между зеркалами интерферометра было защищено от потоков воздуха кожухом, что уменьшало флуктуации длины интерферометра. С выхода интерферометра излучение поступало на фотодетектор ФД2 и далее через аналого-цифровой преобразователь на компьютер для регистрации и обработки данных.

Прошедшее через два полупрозрачных зеркала излучение лазера (350 мВт) с помощью асферической линзы фокусировалось в микроструктурированное волокно Femto White800, на выходе которого спектр излучения уширялся до октавы. Для выделения сигнала, соответствующего сдвигу частотной гребенки  $f_0$ , использовался  $f$ – $2f$ -интерферометр на основе кристалла ВВО. Сигнал биений между второй гармоникой  $n$ -й моды в ИК диапазоне и  $2n$ -й модой в «зеленой» части спектра регистрировался фотодетектором ФД3 и позволял выделить сдвиг гребенки частот:  $2f_n - f_{2n} = 2(f_0 + n f_{\text{rep}}) - (f_0 + 2n f_{\text{rep}}) = f_0$ . Для полученного сигнала отношение сигнал/шум составляло  $\sim 45$  дБ в полосе шириной 100 кГц. Акустооптический модулятор позволял плавно управлять мощностью лазера накачки и, следовательно, величиной  $f_0$ . Стабилизация  $f_0$  осуществлялась с помощью блока фазовой автоподстройки частоты, в качестве опорного сигнала которой использовался сигнал генератора, стабилизированного по водородному стандарту. Сигнал  $f_0$  регистрировался частотомером (на рис.1 не показан), опорный сигнал на который поступал также от водородного стандарта. Область перестройки частоты смещения гребенки полос лежала в пределах 68 – 83 МГц, что в относительных величинах  $q$  соответствовало диапазону 0.13 – 0.17.

### 5. Экспериментальные исследования сдвига гребенки частот фемтосекундного лазерного излучения

При записи интерференционных картин использовалось прецизионное сканирование базы интерферометра, которое осуществлялось путем подачи на пьезокерамический преобразователь пилообразного напряжения с частотой 10 Гц и амплитудой  $\pm 200$  В. Число точек на экс-

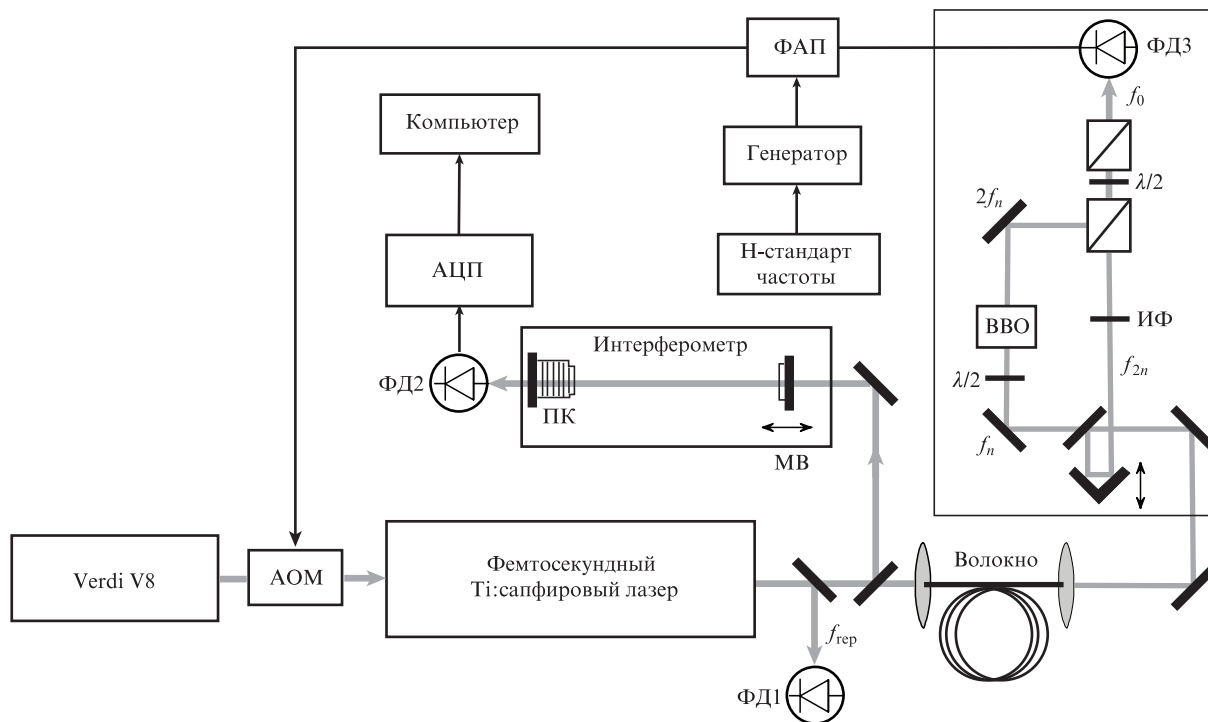


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки:

АОМ – акустооптический модулятор; ФАП – фазовая автоподстройка частоты; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ПК – пьезокерамический преобразователь; МВ – микровинт; ИФ – интерференционный фильтр.

периментальной кривой составляло примерно 2000. Запись могла проводиться как при увеличении, так при уменьшении длины интерферометра.

Исследования были выполнены для отношения длин интерферометра и резонатора лазера  $z = 1/2$ . Для каждого значения  $q$  интерференционная картина записывалась 10 раз как при увеличении, так и при уменьшении длины интерферометра, что позволяло оценить статистическую и систематическую погрешности измерений. На рис.2 представлена типичная интерференционная картина.

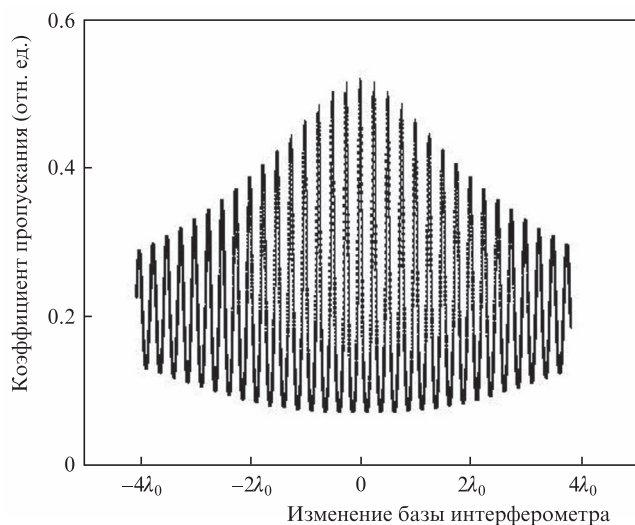


Рис.2. Коэффициент пропускания излучения фемтосекундного лазера интерферометром Фабри–Перо при относительной длине  $z = 1/2$ . Точки – эксперимент, сплошная кривая – расчет по формуле (4) при подгонке ее к экспериментальным данным методом наименьших квадратов.

Наблюдаемое различие экспериментальных и расчетных данных, по-видимому, связано с тем, что нами не проводилось согласования фазовых фронтов лазерного пучка с плоскостью зеркал интерферометра, а это приводило к «неполной» интерференции и, следовательно, к некоторому несоответствию результатов эксперимента и расчета.

Как было показано в наших предыдущих работах [4–6], интервал между соседними полосами пропускания при относительной длине  $z \approx 1/2$  равен  $\lambda_0/4$ , где  $\lambda_0$  – средняя длина волны излучения фемтосекундного лазера. Поскольку оптическая длина интерферометра в нашем случае в два раза меньше, чем при  $z = 1$ , влияние потоков воздуха становится меньше, что приводит к уменьшению статистической погрешности измерения сдвига частотной гребенки фемтосекундного лазерного излучения.

Один из подгоночных параметров задачи – относительная ширина линии излучения фемтосекундного лазера. Расчеты выполнялись в предположении, что форма спектра излучения является гауссовой [6]. Спектр контролировался оптическим спектрометром, изготовленным на основе фотодиодной линейки. С точностью до погрешности измерений результаты практически совпали (рис.3). Ширина линии излучения лазера на полувьсоте составила 25 нм.

При угловой юстировке зеркал интерферометра осуществлялся поиск максимального значения параметра  $p$ . Для оценки точности юстировки проводилась разъюстировка одного из зеркал интерферометра как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. В каждом угловом положении одного из зеркал, прикрепленного к юстировочной головке, выполнялось десять записей. Для каждой записи находилось значение параметра качества интерферометра  $p$ . Статистическая погрешность определения  $p$  составила не более 0,2, в то время как погрешность

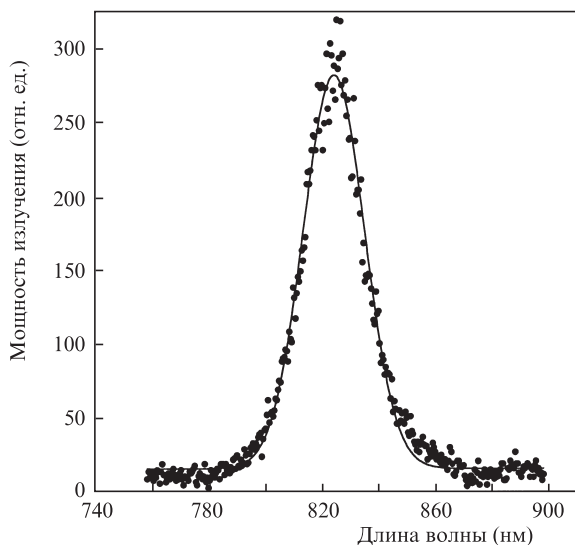


Рис.3. Спектры излучения фемтосекундного лазера, полученные при использовании оптического спектрометра (точки) и при подгонке расчетной зависимости (4) для гауссовой формы спектра к экспериментальным данным, представленным на рис.2 (сплошная кривая).

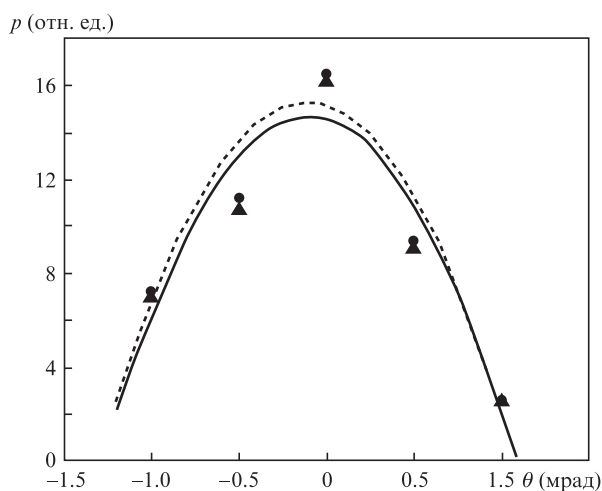


Рис.4. Зависимости параметра качества интерферометра  $p$  от угла расстройки его зеркала  $\theta$  в горизонтальной плоскости в случае записи интерференционной картины при увеличении базы интерферометра (●, штриховая кривая) и при ее уменьшении (▲, сплошная кривая).

установки углового положения зеркал в нашем случае была равна  $\sim 2 \times 10^{-4}$  рад.

На рис.4 приведена зависимость параметра  $p$  от угловой расстройки зеркала по горизонтали. В вертикальной плоскости зависимость была аналогичной. Видно, что значения  $p$  несколько различаются для разных направлений перемещения зеркала. Это связано, по-видимому, с гистерезисом пьезокерамического преобразователя и непараллельностью перемещения зеркала, укрепленного на нем.

При разбюстировке одного из зеркал интерферометра на угол  $\theta = \pm 1$  мрад относительный сдвиг полос пропускания изменялся на  $\pm 0.5$  (рис.5). Как и ранее [6], для  $z = 1/2$  сдвиг полос пропускания измерялся в единицах  $\lambda_0/4$ . Очевидно, что при погрешности установки углового положения зеркала интерферометра, равной  $2 \times 10^{-4}$  рад, относительный систематический сдвиг будет составлять  $10^{-1}$ .

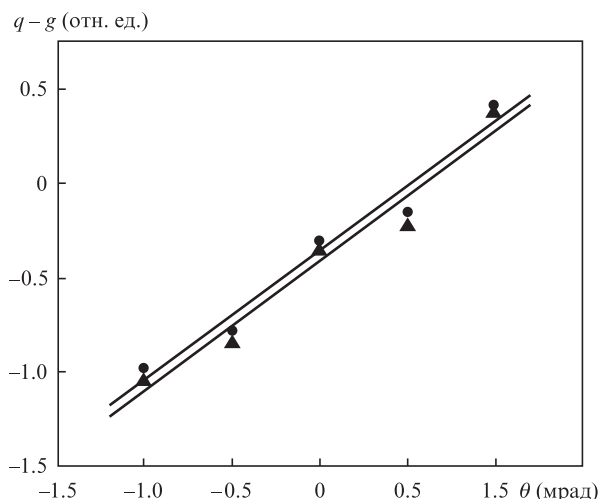


Рис.5. Зависимости относительного расчетного сдвига  $q - g$  гребенки полос пропускания излучения фемтосекундного лазера интерферометром Фабри–Перо от угла  $\theta$  в случае записи интерференционной картины при увеличении длины интерферометра (●) и при ее уменьшении (▲).

Наблюдаемая линейная зависимость сдвига от угла  $\theta$ , по-видимому, связана с непараллельным перемещением зеркала, прикрепленного к пьезокерамическому преобразователю. Такое перемещение приводит к асимметрии огибающей гребенки полос пропускания, т.е. к смещению огибающей интерференционной картины. Из-за гистерезиса пьезокерамического преобразователя для различных направлений перемещения зеркала наблюдается некоторое расхождение оценок смещения полос пропускания (на  $2 \times 10^{-2}$ ).

На рис.6 показаны зависимости смещения полос пропускания (другими словами, величины  $q - g$ ) от частоты  $q$  смещения фемтосекундной гребенки. Измерения были выполнены в условиях, когда угловой дрейф положения зеркал практически отсутствовал. Очевидно, что регистрируемое в нашем эксперименте значение  $q - g$  зависит не только от дисперсии интерферометра, но и от точно-

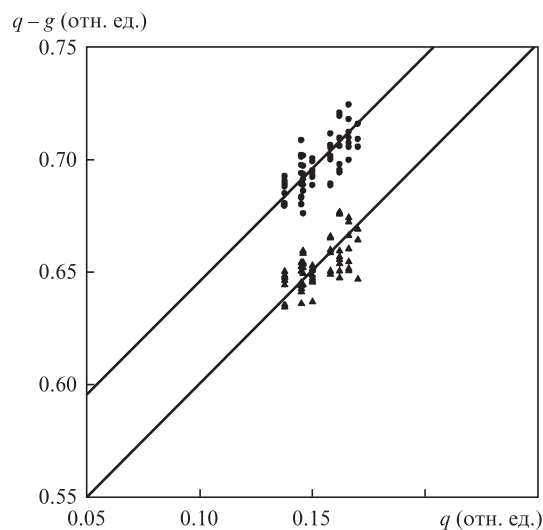


Рис.6. Зависимости относительного расчетного сдвига  $q - g$  гребенки полос пропускания излучения фемтосекундного лазера интерферометром Фабри–Перо от сдвига  $q$ , полученные при увеличении базы интерферометра (●) и при ее уменьшении (▲).

сти юстировки интерферометра. Для наглядного представления о величине случайной погрешности каждой записи интерференционной картины точки, в которых запись осуществлялась при увеличении базы интерферометра, отмечены кружками, а точки, в которых запись осуществлялась при уменьшении этой базы, – треугольниками.

Прямая линия, соответствующая наклону  $\partial(q + g)/\partial q = 1$ , подогнана к экспериментальным данным методом наименьших квадратов. Абсолютная случайная погрешность была менее 5 МГц, а относительная не превышала  $10^{-2}$ . Различие между экспериментальными данными для прямого и обратного смещений зеркала интерферометра составило 10 МГц, что в относительных единицах соответствует  $2 \times 10^{-2}$  и согласуется с результатами, представленным на рис.5.

## 6. Заключение

Измерения сдвига полос пропускания излучения фемтосекундного лазера интерферометром Фабри–Перо с учетом дисперсии зеркал с коэффициентом отражения  $\sim 0.9$  показали, что случайная погрешность определения относительного сдвига фемтосекундной гребенки была равна  $\pm 10^{-2}$ . Систематическая погрешность при этом оценивается как  $\pm 10^{-1}$  и обусловлена, прежде всего, погрешностью юстировки зеркал интерферометра и непараллельным перемещением одного из них при записи интерференционной картины.

Повышение точности измерений (уменьшение случайной и систематической погрешностей) связано, во-первых, с использованием зеркал с более высоким коэффициентом отражения, во-вторых, с согласованием фазовых фронтов светового пучка с интерферометром Фабри–Перо, в-третьих, с увеличением точности угловой юстировки зеркал интерферометра и, в-четвертых, с уменьшением угловой разъюстировки зеркала при его перемещении.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №09-02-00704-а, 09-02-01097-а и 10-02-01352.

1. Udem Th., Reichert J. Holzwarth R., Haensch T.W. *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 3568 (1999).
2. Diddams S.A., Jonts D.J., Ye Jun, Cundiff S.T., Hall J.L., Ranka J.K., Windeler R.S., Holzwarth R., Udem Th., Haensch T.W. *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 5102 (2000).
3. Bagayev S.N., Dmitriyev A.K., Chepurov S.V., Dychkov A.S., Klementyev V.M., Kolker D.B., Kuznetsov S.A., Matyugin Yu.A., Okhapkin M.V., Pivtsov V.S., Skvortsov M.N., Zakharyash V.F., Birks T.A., Wadsworth W.J., Russel P.St.J., Zheltikov A.M. *Laser Phys.*, **11**, 1270 (2001).
4. Бакланов Е.В., Дмитриев А.К. *Квантовая электроника*, **32**, 925 (2002).
5. Баснак Д.В., Дмитриев А.К., Луговой А.А., Покасов П.В. *Квантовая электроника*, **38**, 187 (2008).
6. Баснак Д.В., Бикмухаметов К.А., Дмитриев А.К., Дмитриева Н.И., Луговой А.А., Покасов П.В., Чепуров С.В. *Квантовая электроника*, **40** (2), 187 (2010).
7. Thorpe M.J., Jones R.J., Moll K.D., Ye J., Lalezari R. *Opt. Express*, **13**, 882 (2005).
8. Schliesser A., Gohle C., Udem Th., Hansch Th.W. *Opt. Express*, **14**, 5975 (2006).