

## Об измерении осцилляций поверхности с помощью фемтосекундного лазера

Е.В.Бакланов, В.И.Денисов, С.А.Кузнецов, В.С.Пивцов

*Приведены результаты экспериментальных исследований по измерению малых осцилляций поверхности с помощью фемтосекундного лазера. Показано, что увеличение числа спектральных компонент в излучении приводит к уменьшению минимальной регистрируемой амплитуды колебаний поверхности.*

**Ключевые слова:** фемтосекундный лазер, прецизионные измерения, малые смещения поверхности.

Во многих прикладных задачах и прецизионных физических экспериментах используются оптические методы, которые позволяют регистрировать малые изменения фазы оптических сигналов, возникающие при изменении длины оптического пути под действием различных факторов. В работе [1] чувствительность измерения малых механических смещений зеркала резонатора одночастотного стабильного лазера составляла  $6 \times 10^{-14}$  см на базе 5 м. Анализ возможностей измерения малых смещений поверхности в случае фемтосекундного лазера был выполнен в [2]. Показано, что отношение сигнал/шум может быть увеличено. В настоящей работе приведены результаты эксперимента, подтверждающие этот факт.

Поясним принцип измерения осцилляций поверхности с помощью лазерных методов. Оптическое излучение с частотой  $\omega$ , отраженное от поверхности, имеет три частотные компоненты:

$$E(t) = E \cos \omega t + kaE \sin(\omega - \Omega)t + kaE \sin(\omega + \Omega)t, \quad (1)$$

где  $\Omega$  и  $a$  – частота и амплитуда колебаний поверхности;  $E$  – амплитуда падающей волны;  $k = \omega/c$ ;  $ka \ll 1$ . В спектре имеются две боковые частоты  $\omega \pm \Omega$ , амплитуды которых пропорциональны амплитуде колебаний поверхности. Нетрудно показать, что при квадратичном детектировании (1) сигнал биений на частоте  $\Omega$  отсутствует. Однако в описываемом здесь эксперименте на фотодетекторе наводится напряжение на этой частоте, что, по видимому, связано с различиями фаз и амплитуд боковых компонент (1), которые возникают при прохождении излучения через дисперсионные и поглощающие элементы. Напряжение на частоте  $\Omega$  удобно записать как действительную часть выражения

$$U(t) = U_{\text{sign}} \exp(-i\Omega t) + U_{\text{noise}} \exp(-i\Omega t + i\varphi). \quad (2)$$

Здесь  $U_{\text{sign}}$  – напряжение сигнала, пропорциональное

амплитуде колебаний поверхности;  $U_{\text{noise}}$  – амплитуда шума на частоте  $\Omega$ ;  $\varphi$  – медленно меняющаяся случайная фаза. В эксперименте регистрируется величина  $P = \langle U(t) \times U^*(t) \rangle$ , где усреднение производится по случайной фазе. Так как  $\langle \exp(i\varphi) \rangle = 0$ , то

$$P = U_{\text{sign}}^2 + U_{\text{noise}}^2. \quad (3)$$

Пусть на отражающую поверхность падает излучение фемтосекундного лазера, состоящее из  $N$  спектральных компонент. Регистрация сигнала на частоте  $\Omega$  для каждой из  $N$  компонент отраженной волны осуществляется одним и тем же фотодетектором. В этом случае наведенное напряжение на частоте  $\Omega$  является суммой компонент сигнала из выражения (2):

$$U(t) = \exp(-i\Omega t) \sum_{n=1}^N [U_{\text{sign}} + U_{\text{noise}} \exp(i\varphi_n)]. \quad (4)$$

Будем считать, что  $U_{\text{sign}}$  и  $U_{\text{noise}}$  не зависят от  $N$ , а фазы  $\varphi_n$  некоррелированы, т. е.  $\exp[i(\varphi_n - \varphi_{n'})] = \delta_{nn'}$ . Тогда

$$P = N^2 U_{\text{sign}}^2 + N U_{\text{noise}}^2. \quad (5)$$

Отсюда следует, что при увеличении числа спектральных компонент отношение сигнал/шум возрастет в  $N$  раз. По существу мы имеем дело с интерферометрией интенсивности, эффективность которой в астрономических исследованиях была продемонстрирована Брауном и Твиссом для  $N = 2$  [3].

Для проверки этого вывода был поставлен следующий эксперимент. Одно из зеркал фемтосекундного лазера было приклеено на пьезокерамическую пластину, на которую подавалось синусоидальное напряжение с частотой  $\Omega$ . Измерялась зависимость минимального регистрируемого сигнала биений на частоте  $\Omega$  от числа спектральных компонент  $N$  излучения лазера. При этом мощность излучения, падающего на фотоприемник, поддерживалась постоянной, что позволяло регистрировать зависимость сигнала только от  $N$ . По чувствительности пьезокерамики ( $\sim 10^{-2}$  мкм/В) определялась амплитуда механических колебаний зеркала.

Использовался фемтосекундный Ti:сапфировый лазер со следующими параметрами излучения: средняя

Е.В.Бакланов, В.И.Денисов, С.А.Кузнецов, В.С.Пивцов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: denisov@laser.nsc.ru

Поступила в редакцию 27 апреля 2005 г., после доработки – 27 июня 2005 г.

длина волны излучения 870 нм, средняя мощность 500 мВт, длительность импульсов 40 фс, частота следования  $\omega_r/2\pi = 100$  МГц. Полная ширина спектра по полувысоте составляла 25 нм ( $N \approx 10^5$ ). Сигнал на частоте  $\Omega/2\pi = 10$  кГц регистрировался с помощью анализатора спектра Rohde&Schwarz FSP. Уменьшение числа  $N$  проводилось с помощью интерференционного фильтра. Мощность излучения, падающего на фотоприемник, поддерживалась постоянной при помощи нейтрального светофильтра; режим работы лазера, фотоприемника и анализатора спектра при этом не изменялся. Для нахождения минимальной регистрируемой амплитуды механических колебаний напряжение на пьезокерамике уменьшалось до такого значения, при котором сигнал еще можно было определить на фоне шума.

При максимальном числе спектральных компонент  $N$  минимальный сигнал регистрировался при напряжении на пьезокерамике  $\sim 1$  В, что соответствует амплитуде колебаний зеркала  $\sim 10^{-6}$  см. С уменьшением  $N$  в 2.5 раза напряжение на пьезокерамике составило 3 В, амплитуда была равна  $\sim 3 \times 10^{-6}$  см. Таким образом, увеличение числа спектральных компонент в 2.5 раза привело к уменьшению минимальной регистрируемой амплитуды колебаний в 3 раза, что согласуется с приведенным выше рассмотрением.

Простая стабилизация параметров излучения позволила зарегистрировать амплитуду колебаний  $\sim 10^{-7}$  см. В эксперименте не ставилась задача измерения малых смещений поверхности с точностью, достигнутой при использовании одночастотных стабильных лазеров. В дальнейшем предполагается проведение таких исследований. Нужно отметить, что использование фемтосекундных лазеров может существенно увеличить точность измерений, т. к. число спектральных компонент в их излучении может достигать  $10^6$  и более; можно также надеяться, что использование для уширения спектра специальных оптических волокон позволит увеличить число спектральных компонент более чем на порядок. Это откроет широкие перспективы для увеличения чувствительности при прецизионных измерениях различных величин.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 03-02-17114 а). Авторы благодарят А.К.Дмитриева и П.В.Покасова за полезные обсуждения.

1. Bagayev S.N., Chebotayev V.P., Dychkov A.S., Goldort V.G. *Appl. Phys.*, **25**, 161 (1981).
2. Baklanov E.V., Denisov V.I., Beverini N., Carelli G. *Laser Phys. Lett.*, **1**, 570 (2004).
3. Brown R.H., Twiss R.Q. *Philos. Mag.*, **45**, 663 (1954); Слыш В.И. *УФН*, **87**, 471 (1965).

## ПОПРАВКА

**Е.Х.Бакшт, М.И.Ломаев, А.Н.Панченко, Д.В.Рыбка, В.Ф.Тарасенко, М.Кришнан, Дж.Томпсон.** Мощный источник спонтанного излучения в УФ области спектра: режимы возбуждения («Квантовая электроника», 2005, т. 35, № 7, с. 605–610).

В статье по вине авторов допущена следующая ошибка: на с. 606 в левой колонке, 27-й строке сверху вместо «... 200–650 нм ...» следует читать «... 220–650 нм...».