

задаче оценки частоты отрезка гармонического сигнала // Радиотехника. 2015. № 11. С. 66–71.

13. Хэррис Ф. Дж. Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // ТИИР. 1978. Т. 66. № 1. С. 60–96.

14. Давыдочкин В. М. Анализ помехоустойчивости методов измерений расстояний частотным дальномером // Измерительная техника. 2016. № 4. С. 22–25.

Дата принятия: 16.09.2016.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

535:530.182

Корреляционный нелинейно-оптический фемтосекундный лазерный профилометр с микрометровым пространственным разрешением

Д. Л. ОГАНЕСЯН¹, А. О. ВАРДАНЯН¹, С. Р. МЕЛИКЯН¹, К. Б. САВКИН²,
С. В. ТИХОМИРОВ², Г. Д. ОГАНЕСЯН³

¹Национальный институт метрологии, г. Ереван, Республика Армения

²Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Россия, e-mail: savkin@vniiofi.ru

³Ереванский государственный университет, Ереван, Республика Армения

Предложен новый фемтосекундный корреляционный нелинейно-оптический профилометр с микрометровым пространственным разрешением для повышения точности измерений профиля неоднородности поверхности на расстоянии до 1 км. Принцип работы данного профилометра основан на определении расстояния до сканируемого объекта методом измерений временного интервала между последовательностями опорных (зондирующих) и отражённых фемтосекундных лазерных импульсов. Далее восстанавливается профиль шероховатой поверхности с помощью одномерного пространственного распределения излучения второй гармоники при пространственно-временном совмещении последовательностей зондирующих и отражённых импульсов в нелинейном кристалле. Показано, что пространственное разрешение профилометра составляет не более 5 мкм.

Ключевые слова: профилометр, фемтосекундный лазер, оптическая линия задержки, вторая гармоника, фазовый синхронизм.

For improving the measurement accuracy of the profile of surface irregularities at a distance of 1 km a new femtosecond correlation nonlinear optical profiler with a micron spatial resolution is offered. In the proposed profilometer at first the distance to the object to be scanned by measuring the interval between the sequences of the reference (probing) and reflected femtosecond laser pulses is determined. Then the profile of the rough surface by measuring the one-dimensional spatial distribution of the second harmonic radiation when performing the space-time alignment of the probe and reflected pulse sequences in a nonlinear crystal is restored. It is shown that the spatial resolution of the profilometer is not more than 5 μm .

Key words: profiler, femtosecond laser, optical delay line, second harmonic, phase matching.

В начале 1960 г. для геофизических исследований были созданы лазерные интерференционные приборы (деформографы) с микрометровой инструментальной чувствительностью. Данные приборы применяли для измерений относительных линейных деформаций литосферных плит в зонах геологических разломов пород. Измерения выполняли встроенными в деформографы лазерными интерферометрами на расстояниях до 1 км с погрешностью до долей микрометров. Для исключения влияния атмосферы на точность интерференционных измерений в состав деформографа входили контрольные линии в вакуумированных трубах с прозрачными торцами длиной около 1 км.

Однако при выполнении геодезических линейных

измерений часто требуется информация не об относительных измерениях, когда определяется информация лишь об изменениях длины измеряемой линии, а об абсолютных значениях измеряемых длин такой линии. Для геодезических линейных измерений используются интерферометры, работа которых основана на явлении интерференции периодических последовательностей опорных и отражённых импульсов в фотоприёмнике.

Применение интерферометров позволяет измерять длины и определять деформации в реальном времени, а также производить их мониторинг в течение времени. Такие интерферометры можно использовать для создания эталонных базисов длины, слежения за смещением и деформациями различных элементов и блоков крупных

сооружений (ГЭС, ядерных реакторов) и других стратегических важных объектов. Важно отметить, что в настоящее время не существует лазерных дальномеров и профилометров, работающих и измеряющих профиль неоднородности поверхности в диапазоне до 1 км с микрометровой точностью. Поэтому создание таких приборов является важной и актуальной задачей современной лазерной дальнометрии.

Цель данной работы – разработка нового корреляционного нелинейно-оптического метода измерения профиля неоднородности поверхности на расстояниях до 1 км с микрометровым разрешением.

Суть метода заключается в следующем. В нелинейном кристалле (НК) реализуется пространственно-временное совмещение последовательностей опорных и отражённых от измеряемой поверхности фемтосекундных лазерных импульсов (ФЛИ), приводящее к неколлинеарной генерации второй гармоники на выходе НК. По анализу двумерного распределения энергии второй гармоники определяется профиль неоднородности измеряемой поверхности с микрометровым разрешением.

Пространственно-временное совмещение взаимодействующих ФЛИ реализуется с помощью оптической линии задержки с контролируемым микрометрическим шагом. В качестве источника высокостабильной периодической последовательности ФЛИ предлагается использовать, в частности, волоконный фемтосекундный лазер фирмы Menlo Systems, который генерирует линейно-поляризованные (s-поляризация) импульсы длительностью 90 фс на центральной длине волны (1560 ± 20) нм и энергией не менее 3,5 нДж. Частота следования импульсов варьируется в диапазоне 50–250 МГц, а временной джиттер составляет

порядка 2 фс. Выбор лазера данного типа определяется как тем, что центральная длина волны $\lambda_0 = 1560$ нм находится в полосе прозрачности атмосферы, так и высокой стабильностью частоты следования импульсов.

Схема профилометра, предназначенного для измерения профиля неоднородности поверхности на расстоянии до 1 км, показана на рис. 1.

Процесс измерений осуществляется в два этапа. Первый этап («грубое» измерение) заключается в измерении временного интервала между последовательностями опорных (зондирующих) и отражённых ФЛИ. Второй этап («точное» измерение) заключается в измерении одномерного пространственного распределения излучения второй гармоники при пространственно-временном совмещении последовательностей зондирующих и отражённых ФЛИ в НК.

Первый этап. В момент запуска фемтосекундного лазера с частотой следования опорных ФЛИ $f_0 = 250$ МГц ($f_0 = 1/T_0$, где $T_0 = 4$ нс – период следования импульсов) одновременно запускается многоканальный генератор прямоугольных электрических импульсов с частотой $f_{эл.и} = 12,5$ ГГц (период $T_{эл.и} = 1/f_{эл.и} = 80$ пс, длительность 40 пс), на выходе которого генерируются восемь синхронизированных и сдвинутых во времени относительно друг друга на интервал $T_{эл.и}/8$ последовательностей электрических импульсов длительностью $T_{эл.и}/2$ [1]. Данные восемь последовательностей импульсов направляются на восемь разных счётчиков, которые срабатывают от переднего фронта импульсов.

В момент запуска фемтосекундного лазера ФЛ (см. рис.1) и генератора электрических импульсов ГЭИ подаётся напряжение на ячейку Погкельса ЯП, расположенную между скрещёнными поляризатором П и анализатором А,

которые размещены между зеркалами 32 и 33. При приложении напряжения в результате линейного эффекта Погкельса происходит вращение плоскости поляризации лазерного импульса, что при пространственно-временном совмещении n -го и $(n-1)$ -го ФЛИ на НК приводит к отсутствию неколлинеарной генерации второй гармоники, имеющей место при оо-е-типе взаимодействия волн, когда импульсы накачки соответствуют обычной волне о-типа, а импульс второй гармоники – необыкновенной волне е-типа.

Часть опорных ФЛИ $A_0(t)$ от фемтосекундного лазера проходит через полупрозрачные зеркала ПЗ1, ПЗ2 и с помощью передающего телескопа направляется на исследуемую неоднородную поверхность, находящуюся на расстоянии не более 1 км. На длине волны 1,56 мкм, соответствующей полосе прозрачности атмосферы, ослабление интенсивности ФЛИ, прошедшего расстояние до поверхности и обратно, составляет 0,97.

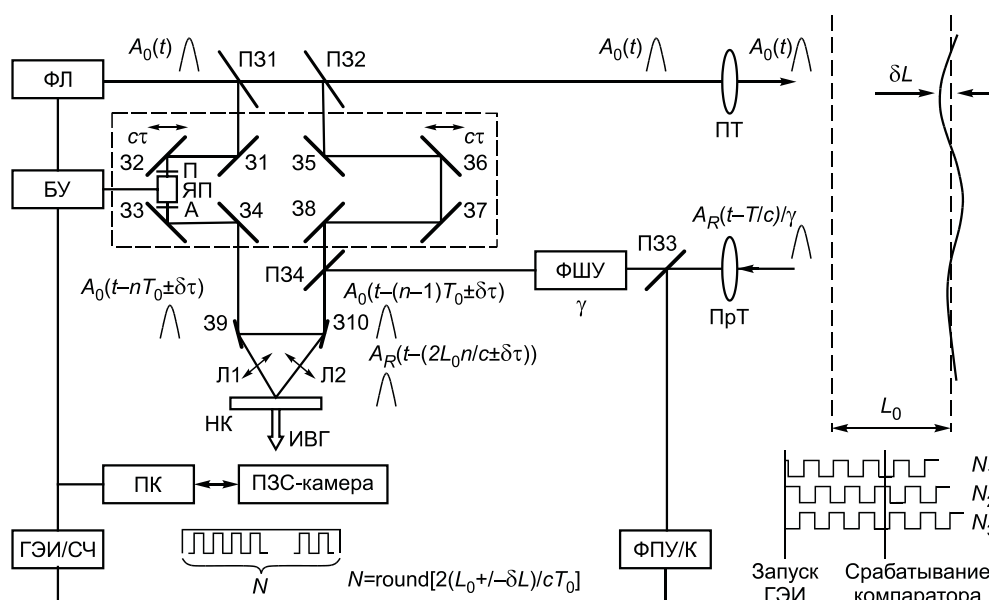


Рис. 1. Схема корреляционного нелинейно-оптического профилометра:

ФЛ – волоконный фемтосекундный лазер; БУ – блок управления; совмещённые в одном блоке ГЭИ – генератор электрических импульсов и СЧ – счётчик; совмещённые в одном блоке ФПУ – фотоприёмное устройство, включающее фотодиод и трансимпедансный усилитель, и К – компаратор; П – поляризатор, А – анализатор, ЯП – ячейка Погкельса; ПК – персональный компьютер; НК – нелинейный кристалл; ИВГ – излучение второй гармоники; ФШУ – фемтосекундный широкополосный усилитель; ПТ, ПрТ – передающий и приёмный телескопы, соответственно; ПЗ1 – ПЗ4 – полупрозрачные зеркала; З1 – З4 – глухие зеркала в составе оптической линии задержки ОЛЗ1; З5 – З8 – глухие зеркала в составе оптической линии задержки ОЛЗ2

Согласно паспортным данным предлагаемого волоконно-фемтосекундного лазера диаметр пучка на выходе составляет 102 мм, а энергия импульса – 3,5 нДж. При диаметре линзы передающего телескопа 100 мм, входном диаметре приёмного телескопа 150 мм и расстоянии до неоднородной поверхности 1 км пиковая мощность на выходе приёмного телескопа составит не менее 200 мкВт с учётом пропускания атмосферы порядка 0,97, допущения о диффузном характере отражения импульсного лазерного излучения, коэффициенте отражения поверхности около 0,4 и коэффициенте пропускания просветлённого приёмного телескопа порядка 0,9.

На приёмный телескоп падает плоский волновой фронт отражённого от исследуемого объекта излучения. С выхода приёмного телескопа часть отражённых ФЛИ с помощью полупрозрачного зеркала ПЗЗ направляется на фотоприёмное устройство (ФПУ), в котором используется InGaAs-фотоприёмник фирмы Newport, предназначенный для регистрации импульсного излучения в диапазоне длин волн 630–1620 нм с полосой 38–35 ГГц и временем нарастания 12,5 пс. Временной отклик фотоприёмника на ФЛИ длительностью не более 100 фс, которую можно считать дельта функцией, совпадает с импульсной характеристикой фотоприёмника $\exp(-t/\tau_g)$, где $\tau_g \approx 1/(2\pi\Delta f) = 1/(2 \cdot 35\pi) = 4,2$ пс [2].

Остальная часть ФЛИ, прошедших через полупрозрачное зеркало ПЗЗ, направляется на два последовательно установленных волоконных фемтосекундных широкополосных усилителя ФШУ с коэффициентами усиления $4 \cdot 10^4$ и $4 \cdot 10^3$, соответственно, обеспечивая общее усиление отражённых ФЛИ до средней мощности 3,5 нДж. Широкополосные усилители входят в состав волоконного фемтосекундного лазера. При чувствительности InGaAs-фотоприёмника –65 В/Вт сила тока в импульсе на входе трансимпедансного усилителя составит не менее 20 мкА, что обеспечит отношение сигнал-шум более 10^3 .

В момент регистрации фотоприёмником отражённых ФЛИ срабатывает компаратор К, установленный на выходе трансимпедансного усилителя, входящего в состав ФПУ. Трансимпедансное усиление управляется постоянным напряжением и составляет 1 В/мА. В момент срабатывания компаратора прерывается генерация электрических импульсов и прекращается счёт импульсов счётчиками СЧ. Количество импульсов, регистрируемых счётчиками, с момента запуска до момента прерывания генерации N_1-N_8 соответствует целой части величины, равной удвоенному расстоянию до сканируемой поверхности: $[2(L_0 \pm \delta L)/cT_{\text{эл.и}}]$, где $[\cdot]$ обозначает целую часть, $(L_0 \pm \delta L)$ – расстояние до неоднородной поверхности; L_0 – расстояние до средней линии поверхности, определяемое на первом этапе по измерениям временного интервала между последовательностями опорных (зондирующих) и отражённых ФЛИ; δL – отклонение профиля шероховатой поверхности от средней линии профиля в заданной фиксированной точке сканируемой поверхности (см. рис. 1), определяемое на втором этапе по результатам измерений одномерного пространственного распределения излучения второй гармоники при пространственно-временном совмещении последовательностей зондирующих и отражённых ФЛИ в НК. Когда компаратор срабатывает в момент времени, кратный целому числу $mT_{\text{эл.и}}$ (где $m \in \mathbb{Z}$), то количество импульсов будет связано соотношениями

$$N_2 = N_1 - 1; N_3 = N_2 - 1 = N_1 - 2; \dots N_8 = N_7 - 1. \quad (1)$$

В общем случае, когда компаратор срабатывает в произвольный момент времени в интервале от $(m-1)T_{\text{эл.и}}$ до $mT_{\text{эл.и}}$, то соотношения (1), начиная с некоторого значения N_p , соответствующего моменту прихода отражённого ФЛИ, нарушаются. В частности, если момент прихода ФЛИ больше $N_3 T_{\text{эл.и}}$ и меньше $N_4 T_{\text{эл.и}}$, то соотношение (1) между N_1-N_8 нарушается, начиная с $N_4 \neq N_3 - 1$ ($N_4 = N_3 - 2$). Следовательно, после срабатывания компаратора методом вычисления количества импульсов N_1-N_8 можно определить расстояние до неоднородной поверхности с точностью до $c\delta t = cT_{\text{эл.и}}/8 = 3$ мм, где $c\delta t = 2\delta L$, c – скорость света в вакууме; δt – временной интервал, за который импульс проходит расстояние $2\delta L$. После определения значения L_0 , измеренного с точностью 3 мм, изменяются оптические пути импульсов в оптических линиях задержки ОЛЗ1 и ОЛЗ2, состоящих из зеркал 31–34 и 35–38 (см. рис. 1), соответственно. Зеркала размещены на устройстве автоматизированного линейного перемещения с шагом не более 0,5 мкм.

Второй этап. Реализация этого этапа происходит после уточнения параметров оптических линий задержки ОЛЗ1 и ОЛЗ2 и отключения напряжения, подаваемого на ячейку Покекельса. С целью пространственно-временного совмещения n -го ФЛИ с $(n-1)$ -м в соответствии с измеренным значением L_0 изменяются оптические пути ФЛИ через оптические линии задержки ОЛЗ1 и ОЛЗ2; n -й и $(n-1)$ -й ФЛИ с выходов оптических линий задержки ОЛЗ1 и ОЛЗ2 с помощью зеркал 39–310 направляются на НК под углом $\theta_0/2$ относительно нормали к кристаллу. Угол θ_0 соответствует выполнению условия оо-е-типа неколлинеарного фазового синхронизма при генерации второй гармоники. Условие имеет место при пространственно-временном совмещении ФЛИ, падающих на НК.

Схема неколлинеарной генерации второй гармоники, используемая в профилометре, представлена на рис. 2. Падающие пучки пересекаются в НК таким образом, что

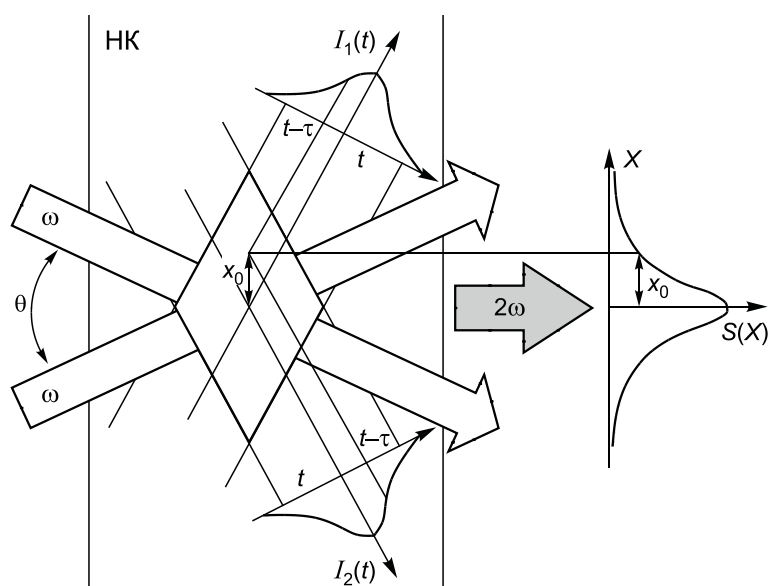


Рис. 2. Геометрия неколлинеарной генерации второй гармоники одиночными импульсами накачки; НК – нелинейный кристалл; 2ω – частота излучения второй гармоники

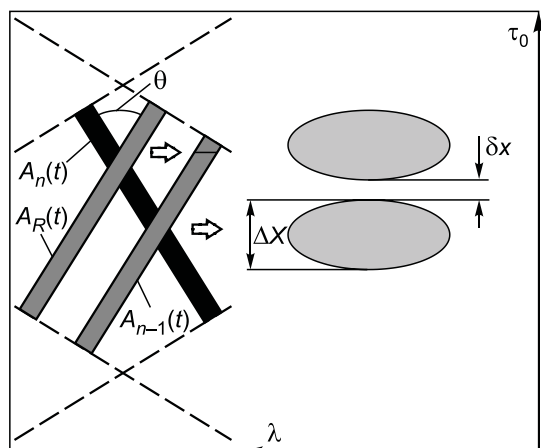


Рис. 3. Неколлинеарное взаимодействие $A_n(t)$ -го импульса с $A_{n-1}(t)$ -м и отражённым $A_R(t)$ импульсами в НК

угол θ между ними соответствует условию возникновения векторного синхронизма, когда генерация второй гармоники происходит в направлении биссектрисы этого угла. Толщина НК должна быть достаточно малой, чтобы ширина полосы спектрального синхронизма превышала ширину спектра импульса. Распределение интенсивности второй гармоники, изменяющейся вдоль оси X , определяется корреляцией временных профилей интенсивностей взаимодействующих импульсов $I_1(t)$, $I_2(t)$ [3–5]:

$$S(\tau_0) = \int I_1(t - \tau_0) I_2(t + \tau_0) dt,$$

где $\tau_0 = n_0 x \sin(\theta/2)/c$; n_0 – коэффициент преломления НК на длине волны λ_0 ; c – скорость света в вакууме. Величина $a = \tau_0/x = n_0 \sin(\theta/2)/c$ соответствует коэффициенту временной развертки [5].

Изображение неколлинеарной генерации второй гармоники регистрируется ПЗС-камерой в режиме многократной регистрации, передаётся на персональный компьютер (ПК) и обрабатывается. В качестве НК предлагается использовать кристалл типа ВВО толщиной равной 0,1 мм, ширина полосы синхронизма которого на длине волны 1,56 мкм составляет 345 нм. Коэффициент нелинейной восприимчивости d_{31} составляет 0,16 пм/В при угле $\theta_c = 90^\circ$ между оптической осью кристалла и направлением распространения излучения второй гармоники (90-градусный синхронизм), угле $\theta = 40,46^\circ$ и угле между импульсами в воздухе $\theta_0 = 69,41^\circ$. Выбранный режим синхронизма обеспечивает эффективное удвоение частоты расходящегося лазерного пучка [6].

Коэффициент временной развертки $n_0 \sin(\theta/2)/c$ при этом составляет 1,9 фс/мкм. Ширина спектра Гауссова импульса на длине волны 1,56 мкм длительностью 90 фс составляет 39,7 нм, что меньше ширины полосы синхронизма кристалла типа ВВО в 8,7 раза. При диаметре $\sigma_0 = 10$ мкм пучка, фокусируемого на НК, энергия ФЛИ длительностью 90 фс и энергией в импульсе 3,5 нДж, приходящаяся на единицу площади, составляет 4 мДж/см². Эффективность генерации второй гармоники запишем как

$$I^{2\omega}/I^\omega = 2\eta_0 \omega^2 d_{31}^2 I^\omega L^2 / (c^2 n_0^3), \quad (2)$$

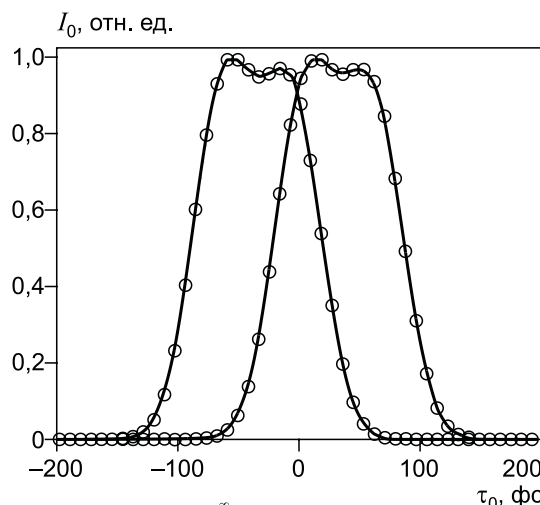


Рис. 4. Зависимость $I_0(\tau_0) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\omega, \tau_0) d\omega$ от времени, соответствующая распределению энергии второй гармоники вдоль временной оси X для значения $\delta\tau/2 = \pm 67,5$ фс, полученная в результате численного интегрирования выражения (4)

где $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$, μ_0 , ϵ_0 – магнитная проницаемость вакуума и электрическая постоянная соответственно; L – толщина кристалла.

При выбранных значениях параметров эффективность генерации второй гармоники в соответствии с (2) составляет $1,3 \cdot 2,87 \cdot 10^{-4} \text{ пДж}^2$. С учётом вышеприведенных значений энергия излучения второй гармоники на выходе НК составит 1 пДж. Фокусировка пучков на торец НК осуществляется с помощью линз $L1$, $L2$ соответственно (см. рис. 1). Размер пиксела современных монохромных ПЗС-камер с высокой чувствительностью, работающих в режиме многократной регистрации при размере регистрирующей площадки 7,60×6,20 мм, составляет не более 4,65×4,65 мкм. При этом одному пикселу рассматриваемой ПЗС-камеры будет соответствовать временной интервал $4,65 \text{ мкм} \cdot 1,9 \text{ фс/мкм} = 8,83 \text{ фс}$.

Синхронизация управляющих сигналов осуществляется блоком управления БУ (см. рис. 1), получающим синхросигналы от блоков генератора электрических импульсов ГЭИ, счётчика СЧ, компаратора К и от персонального компьютера ПК. Отражённые от неоднородной поверхности ФЛИ с выхода фемтосекундного широкополосного усилителя направляются на полупрозрачное зеркало $L34$ и далее с помощью зеркала $L30$ направляются на НК под углом $\theta_0/2$ к его нормали. Таким образом, на НК направляются следующие ФЛИ:

$$\begin{aligned} &A_0(t - nT_0 \pm \delta\tau); \\ &A_0(t - (n-1)T_0 \pm \delta\tau), \end{aligned} \quad (3)$$

где $A_0(t - nT_0 \pm \delta\tau)$, $A_0(t - (n-1)T_0 \pm \delta\tau)$ – ФЛИ на выходах управляемых оптических линиях задержки ОЛЗ1, ОЛЗ2, соответственно.

На НК параллельно с импульсами (3) направляются также отражённые и усиленные ФЛИ $A_R(t - 2L_0/c \pm \delta\tau/2)$. При пространственно-временном совмещении ФЛИ в НК под углом θ друг к другу, происходит неколлинеарная генерация второй гармоники (рис. 3). Состояния поляризации ФЛИ соответствуют обыкновенной волне, а состояние поляризации импульса второй гармоники – необыкновенной. Согласно рис. 3, пространственное

распределение энергии второй гармоники, регистрируемое ПЗС-камерой вдоль временной оси X , будет представлять два импульса, разнесённых на временной интервал $\pm\delta\tau/2$. Знак «плюс» соответствует случаю, когда отражённый импульс $A_R(t - 2L_0/c \pm \delta\tau/2)$ отстаёт от импульса $A_0(t - (n-1)T_0)$, а «минус» – когда опережает. Путём одновременного увеличения или уменьшения оптического пути с помощью управляемых линий задержки ОЛЗ1 и ОЛЗ2 на расстояние $\delta x = \pm c\delta\tau/2$ можно получить пространственно-временное совпадение двух импульсов, когда пространственное распределение энергии второй гармоники вдоль оси X будет соответствовать временному профилю импульса ФЛИ, а длительность которого будет в $\sqrt{2}$ раза меньше длительности ФЛИ. Вертикальная ось соответствует зависимости от длины волны излучения второй гармоники [3–5].

Очевидно, что временное разрешение будет ограничено протяженностью ΔX импульса второй гармоники вдоль оси X , т. е. длительностью. В частности, для рассматриваемых ФЛИ длительностью 90 фс, длительность импульса второй гармоники будет составлять 63,65 фс, что соответствует протяженности $\Delta X = 19$ мкм. Для ПЗС-камеры рассматриваемого типа протяжённость ΔX будет соответствовать четырём пространственно-разрешаемым элементам. Разрешение предлагаемого метода, обусловленное шагом устройства автоматизированного линейного перемещения (не более 0,5 мкм), соответствует временному интервалу 1,66 фс, что в 5,3 раза меньше пространственного разрешения ПЗС-камеры, равного 4,65 мкм (8,83 фс).

На рис. 4 представлены распределения энергии второй гармоники вдоль оси X для $\delta\tau/2 = \pm 67,5$ фс, полученные в результате численного расчёта интеграла

$$I(\omega, \tau_0) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} (A_{n-1}(t) + A_R(t)) A_n(t - \tau_0) \exp\{-j\omega\tau_0\} dt \right|^2, \quad (4)$$

где $\tau_0 = n_0 x \sin(\theta/2)/c$. Кружочками показаны значения распределения энергии, взятые в моменты времени, соответствующие временному разрешению, т.е. в точках отстоящих друг от друга на временном интервале 8,83 фс.

Калибровка предлагаемого профилометра осуществляется также в два этапа. Сначала в режиме оптического «короткого замыкания» калибруется блок генерации второй гармоники на соответствие пространственно-временного смещения n -го и $(n-1)$ -го ФЛИ в НК и отработки программы анализа пространственного распределения энергии второй

гармоники. Далее осуществляется калибровка профилометра в целом. В этом случае ФЛИ с выхода передающего телескопа с помощью двухзеркальной системы направляются на вход приёмного телескопа. В данном режиме калибруются, в частности, временные параметры синхронизации срабатывания компаратора с прерыванием счётчика, запуска генератора электрических импульсов и пр.

Закключение. Микрометровое разрешение нового типа фемтосекундного корреляционного нелинейно-оптического профилометра достигается благодаря пространственно-временному совмещению в НК последовательностей опорных и отражённых от измеряемой поверхности ФЛИ, приводящее к неколлинеарной генерации второй гармоники на выходе НК.

При выполнении экспериментальных исследований использовано оборудование Национального института метрологии республики Армения и Центра коллективного пользования высокоточными методами и средствами оптико-физических измерений Всероссийского научно-исследовательского института оптико-физических измерений.

Л и т е р а т у р а

1. **Georg Paul Emil von Bueren.** Clock and Data Recovery Circuit and Clock Synthesizers for 40 Gb/s High-Density Serial I/O-Links in 90-nm CMOS. [Электрон. версия] <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:4700/eth-4700-02.pdf>, ETH ZÜRICH, 2011.
2. **Херман Й., Вильгельми Б.** Лазеры сверхкоротких световых импульсов, М.: Мир, 1986.
3. **Авакян Р. А., Варданян А. О., Оганесян Д. Л.** Кросс-корреляционный метод определения формы одиночного УКИ // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. № 1. С. 75–77.
4. **Варданян А.О., Маилян А.Э., Оганесян Д.Л.** О корректности восстановления временного профиля одиночного УКИ света кросс-корреляционным методом // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 9. С. 861–863.
5. **Rick Trebino.** Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses. Springer Science+Business Media, LLC, ISBN-13: 978-1402070662, 2002.
6. **Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В.** Прикладная нелинейная оптика. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.

Дата принятия: 01.03.2017.