

Комплекс технических средств для воспроизведения, хранения и передачи единицы длительности импульса лазерного излучения в диапазоне $5 \cdot 10^{-11}$ – $1 \cdot 10^{-9}$ с в составе государственного первичного специального эталона

М. В. Канзюба, А. Б. Берлизов, В. Н. Крутиков, Г. Г. Фельдман

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

Описан комплекс технических средств для воспроизведения, хранения и передачи единицы длительности импульса лазерного излучения в диапазоне $5 \cdot 10^{-11}$ – $1 \cdot 10^{-9}$ с. Данный комплекс введён в состав Государственного первичного специального эталона единиц энергии, распределения плотности энергии, длительности импульса и длины волны лазерного излучения ГЭТ 187–2016.

Ключевые слова: эталон, параметры лазерного излучения, длительность импульса.

В импульсных лазерных системах характер и интенсивность взаимодействия излучения с веществом определяются мгновенной мощностью излучения. Поэтому наряду с энергетическими характеристиками импульсного лазерного излучения, такими как средняя мощность и энергия импульса, большое значение имеют временные характеристики. Важнейшей временной характеристикой является длительность импульса лазерного излучения.

Общепринятое определение длительности импульса лазерного излучения дано в международном стандарте ISO 11554:2006 (ГОСТ Р ИСО 11554–2008). Согласно этому документу, длительность импульса – это максимальный временной интервал между двумя точками по оси времени, в которых мощность достигает половины пиковой мощности.

В состав Государственного первичного специального эталона единиц энергии, распределения плотности энергии, длительности импульса и длины волны лазерного излучения ГЭТ 187–2010 входит комплекс средств измерений для воспроизведения и передачи единицы длительности импульса лазерного излучения [1], воспроизводящий единицу длительности импульса в диапазоне $1 \cdot 10^{-9}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ с.

Актуальность работ по совершенствованию ГЭТ 187–2010 с целью расширения временного диапазона в пикосекундную область обусловлена применением пикосекундных лазеров в системе ГЛОНАСС, медицине, научных исследованиях, оборонной технике, а также для обработки материалов и др. Информация о временных характеристиках импульса (форме, длительности, времени нарастания и спада) необходима для выбора оптимального режима облучения. В лазерной дальнометрии стандартным способом повышения точности измерений является уменьшение длительности зондирующего импульса [2].

Для измерений временных параметров пикосекундных лазерных импульсов необходимы средства измерений утверждённого типа. Аппаратура, с помощью которой можно измерять временные характеристики лазерного излучения в пикосекундном диапазоне, существует, но не имеет нормированных метрологических характеристик. Для нормирования

метрологических характеристик средств измерений частотно-временных характеристик импульсного лазерного излучения необходимо создание соответствующей эталонной базы.

В результате совершенствования ГЭТ 187–2010 создан комплекс технических средств для воспроизведения, хранения и передачи единицы длительности импульса лазерного излучения в диапазоне $5 \cdot 10^{-11}$ – $1 \cdot 10^{-9}$ с (далее – комплекс). Созданный комплекс введён в состав эталона, утверждённого Приказом Росстандарта от 30.12.2016 г. № 2089 «Об утверждении Государственного первичного специального эталона единиц энергии, распределения плотности энергии, длительности импульса и длины волны лазерного излучения» с присвоением регистрационного номера ГЭТ 187–2016. Структурная схема комплекса показана на рис. 1.

Составные части комплекса:

система оптической аппаратуры, включающая фемтосекундный лазер TiF-50F с блоком управления и системой охлаждения, электрооптический модулятор OG8-1-1 с блоком управления, интерферометр Фабри-Перо, оптоволоконный стретчер, электронно-оптическую камеру (ЭОК), светоделительную пластину, комплект светофильтров из оптического цветного стекла типа НС по ГОСТ 9411–91 «Стекло оптическое цветное. Технические условия», комплект оптики и оптомеханики, оптический стол;

система управления, регистрации и документирования результатов измерений, включающая персональный компьютер (ноутбук) и принтер;

аппаратура контроля режима работы комплекса, включающая измеритель мощности лазерного излучения NOVA II с термоэлектрическим датчиком 3А, спектрометр ASP-150T, термометр ИВА-6Н.

Программное обеспечение комплекса позволяет производить измерения, осуществлять контроль и управление параметрами входящей в состав комплекса аппаратуры.

Комплекс воспроизводит единицу длительности импульса лазерного излучения в диапазоне $5 \cdot 10^{-11}$ – $1 \cdot 10^{-9}$ с на длине волны 0,755 мкм. Воспроизводимая эталоном единица – длительность одиночного лазерного импульса, генерируемого с

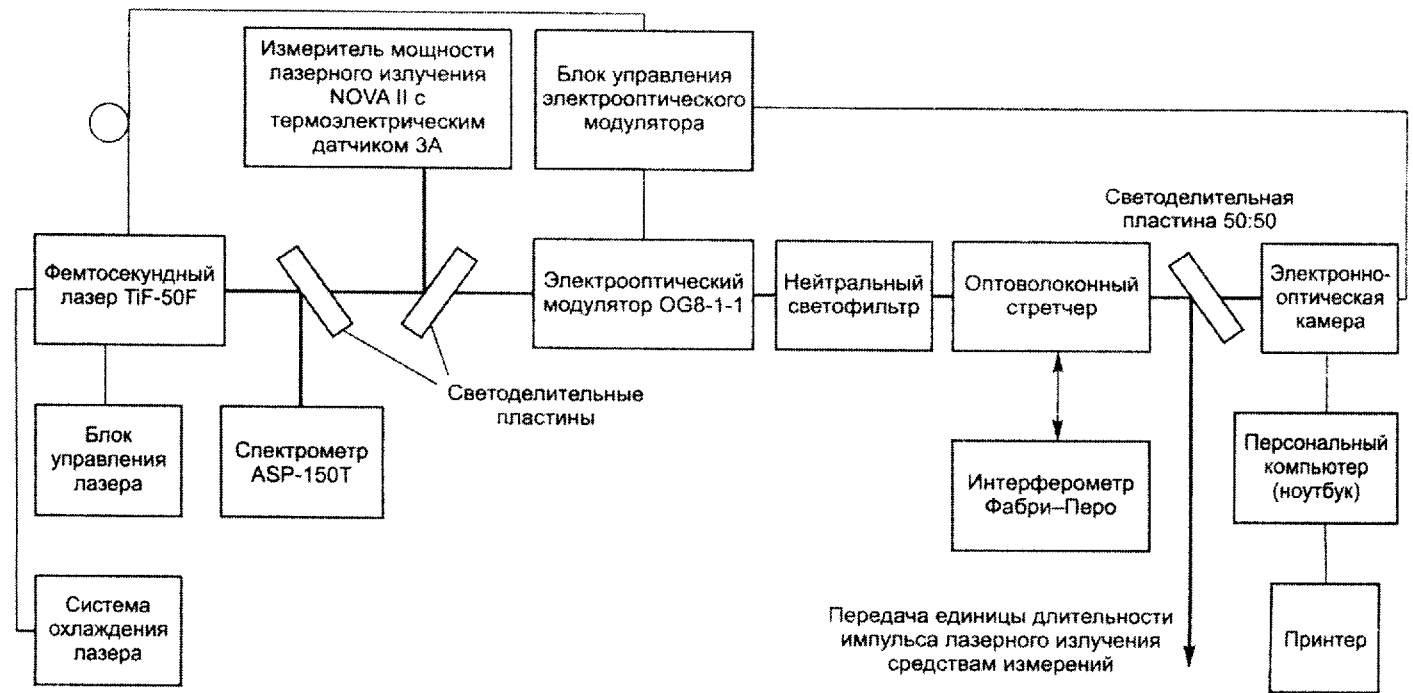


Рис. 1. Структурная схема комплекса технических средств для воспроизведения, хранения и передачи единицы длительности импульса лазерного излучения в диапазоне $5 \cdot 10^{-11} - 1 \cdot 10^{-9}$ с

помощью входящих в состав эталона основных технических средств, к которым относятся фемтосекундный лазер, электрооптический модулятор, система зеркал, оптоволоконный стретчер. Длительность генерируемого импульса измеряется электронно-оптической камерой. Измерения начинаются после установления стационарного режима генерации фемтосекундного лазера, в котором стабильны параметры излу-

чения, такие как средняя мощность, длина волны и ширина спектральной линии генерации. Среднюю мощность излучения лазера контролируют с помощью термоэлектрического датчика, а длину волны и ширину спектральной линии генерации – спектрометром. Контроль климатических параметров в помещении, где находится комплекс, осуществляется с помощью термогигрометра. Измеряемая в эксперименте длительность импульса должна соответствовать определению в ГОСТ Р ИСО 11554–2008, т. е. используемая методика измерения предполагает нахождение по зарегистрированной зависимости мощности от времени таких точек (моментов времени), в которых мощность достигает половины пиковой мощности.

Оценить значение воспроизводимой единицы (длительности лазерного импульса) можно по формуле

$$\tau_{\text{оц}} = kx,$$

где k – коэффициент развёртки, определяемый в процессе калибровки временной шкалы ЭОК; x – результат измерения длительности импульса на фотохронограмме.

Рассчитанная таким образом оценка отличается от истинной длительности импульса, поскольку полученный с помощью ЭОК профиль интенсивности импульса в общем случае представляет собой свёртку реального профиля интенсивности с временной аппаратной функцией (ВАФ) ЭОК. Для определения истинной длительности импульса необходимо произвести деконволюцию измеренного профиля интенсивности с ВАФ.

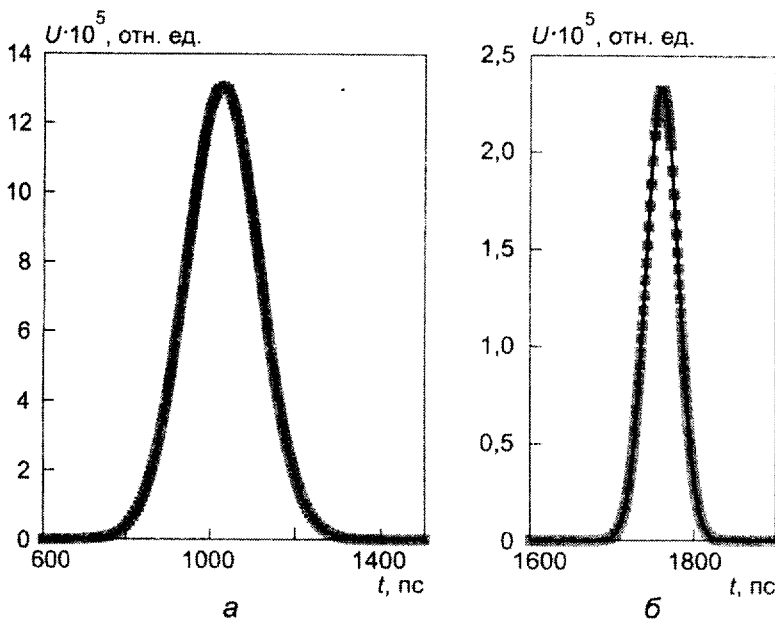


Рис. 2. Аппроксимация функцией Гаусса измеренного профиля генерируемого комплексом импульса лазерного излучения (а) и ВАФ ЭОК, измеренной как отклик на импульс длительностью менее 50 фс (б); t – время измерения

Государственные эталоны

Бюджет неопределённости воспроизведения комплексом единицы длительности импульса лазерного излучения

Временная аппаратная функция является импульсной характеристикой ЭОК и может быть экспериментально измерена как отклик ЭОК на ультракороткий (фемтосекундный) лазерный импульс [3]. Как было установлено в экспериментах, генерируемый комплексом импульс и ВАФ ЭОК имеют гауссову форму (рис. 2). В этом случае коррекция систематической погрешности, связанной с конечной длительностью ВАФ, может быть проведена с помощью введения поправки в уравнение измерений, которое в результате приобретает вид

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{оц}}^2 - \delta^2} = k\sqrt{x^2 - x_\delta^2}, \quad (1)$$

где τ – длительность генерируемого комплексом импульса; δ – длительность по уровню 0,5 ВАФ ЭОК; x_δ – ширина по уровню 0,5 ВАФ ЭОК на фотохронограмме.

Для снижения влияния шумов значение x принимается равным среднему арифметическому значению результатов 10 измерений.

Временная шкала ЭОК калибруется методом формирования временных интервалов с помощью интерферометра Фабри–Перо (ИФП) [4]. При подаче на ИФП одиночного фемтосекундного импульса длительностью $\tau_n \ll T = 2nd/c$ (n – показатель преломления воздуха; d – база ИФП (толщина промежуточного кольца); c – скорость света в вакууме) формируется цуг импульсов, которые регистрируются ЭОК. Временной интервал между последовательными импульсами в цуге одинаков и равен времени T двукратного прохода лазерного импульса между зеркалами ИФП. Таким образом, толщина базы ИФП задаёт временной интервал, который с помощью импульса фемтосекундного лазера передаётся ЭОК при калибровке. Локальные значения коэффициента развёртки рассчитываются по формуле

$$k_i = T/(\Delta x)_i,$$

где $(\Delta x)_i$ – интервалы между последовательными импульсами в цуге на фотохронограмме.

Коэффициент развёртки k определяется как среднее арифметическое локальных значений. В результате калибровки получено $k=1,59$ пс/пиксел. Длительность по уровню 0,5 ВАФ ЭОК также была измерена при калибровке ЭОК как отклик на отдельный фемтосекундный импульс лазера и составила $\delta=49,0$ пс.

В результате проведённых метрологических исследований комплекса определены стандартные неопределённости величин, входящих в уравнение измерений (1). Бюджет неопределённости воспроизведения комплексом единицы длительности импульса лазерного излучения приведён в таблице.

Составляющая неопределённости и её источники	Значение, %
Стандартная неопределённость, оцениваемая по типу А $u_A(\tau)$	1,52
Стандартная неопределённость типа В $u_B(\tau)$, в том числе	1,53
дискретность изображения фотохронограммы $u_d(\tau)$	0,34
неопределённость калибровки временной шкалы ЭОК $u_x(\tau)$	1,48
неопределённость поправки к значению длительности импульса вследствие конечной длительности ВАФ ЭОК $u_n(\tau)$	0,17
Суммарная стандартная неопределённость $u_c(\tau)$	2,15
Расширенная неопределённость для коэффициента охвата $k=2$ ($P=0,95$) $U_{0,95}(\tau)$	4,30

Передача единицы от комплекса другому средству измерений длительности импульса лазерного излучения осуществляется с помощью входящих в состав комплекса фемтосекундного лазера, электрооптического модулятора, оптоволоконного стретчера и светоделителя. Фемтосекундный лазер, электрооптический модулятор и оптоволоконный стретчер служат для формирования светового импульса с длительностью в пикосекундном диапазоне. Светоделитель перераспределяет световой поток, направляя часть его на ЭОК комплекса, а другую часть на средство измерений, которому передаётся единица длительности импульса лазерного излучения. Тем самым средство измерений и ЭОК измеряют временные характеристики одного и того же импульса. Значение единицы, передаваемое средству измерений, принимает значение длительности импульса, измеренной ЭОК комплекса. В результате использования метода одновременных измерений, неопределённость передачи единицы равна неопределённости её воспроизведения.

Заключение. Применение ГЭТ 187–2016 позволит:

обеспечить единство измерений временных характеристик импульсного лазерного излучения в лазерной дальнометрии, медицине, технологиях лазерной обработки материалов, военной сфере;

создать условия для расширения диапазона измерений временных характеристик импульсного лазерного излучения; на базе выпускаемых электронно-оптических камер, автокорреляторов и быстродействующих фотоприёмников создать парк средств измерений временных характеристик импульсного лазерного излучения.

Во ВНИИОФИ продолжают исследования и разработки, направленные на дальнейшее развитие эталонной базы в области измерения временных характеристик импульсного лазерного излучения в части расширения диапазона воспроизведения единицы длительности импульса и повышения точности измерений [5].

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП высокоточных измерительных технологий в области фотоники, созданного на базе ВНИИОФИ и поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 14.595.21.0003 от 28.08.2017 г. (уникальный идентификатор RFMEFI59517X0003).

Литература

1. Абдрахманов К. Ш., Либерман А. А., Москалюк С. А., Улановский М. В. Государственный первичный специальный эталон единиц энергии, распределения плотности энергии, длительности импульса и длины волны лазерного излучения // Измерительная техника. 2013. № 12. С. 3–7.

2. Лазерные приборы и методы измерения дальности: учеб. пособие / Под ред. В. Е. Карасика. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 96 с.

3. Воробьев Н. С., Дегтярев В. П., Коробкин В. В., Щелев М. Я. Об измерении временного разрешения ЭОП методами биения мод и ультракоротких импульсов / Труды 14 Международного конгресса по высокоскоростной фотографии и

фотонике. Москва, 19–24 окт. 1980. Б.м.: Б.и., 1982. С. 238–244.

4. Берлизова А. Б., Золотаревский Ю. М., Иванов В. С., Крутиков В. Н., Лебедев В. Б., Фельдман Г. Г. Установка для комплексной настройки и калибровки средств измерений временных характеристик оптических импульсов // Измерительная техника. 2011. № 10. С. 17–20.

5. Kanzyuba M. V., Berlizov A. B., Krutikov V. N., Lebedev V. B., Feldman G. G. Development of the standard for laser pulse duration in the picosecond range // Proc. SPIE. Selected Papers from the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics. 2017. V. 10328. N. 103280G. 8 P. <https://doi.org/10.1117/12.2269298>.

Дата принятия: 20.07.2018.

Complex of technical means for reproduction, storage and transfer of the unit of pulse duration of laser radiation in the range $5 \cdot 10^{-11}$ – $1 \cdot 10^{-9}$ s as part of the national primary special standard

M. V. Kanzyuba, A. B. Berlizov, V. N. Krutikov, G. G. Feldman

All-Russia Research Institute of Optophysical Measurements (VNIIOFI), Moscow, Russia, e-mail: mkanzyuba@vniiofi.ru

The complex of technical means for reproduction, storage and transfer of the unit of pulse duration of laser radiation in the range $5 \cdot 10^{-11}$ – $1 \cdot 10^{-9}$ s, is described. The complex has been introduced into the National primary special standard for the units of energy, energy density distribution, pulse duration, and wavelength of laser radiation GET 187–2016.

Key words: measurement standard, parameters of laser radiation, pulse duration.