

Обеспечение единства и точности измерений энергии пикосекундных импульсов лазерного излучения

А. Г. МАКСАК¹, И. В. КОЗАК¹, А. В. ПЛОТНИКОВ¹, А. С. ИЛЬИН²,
М. В. УЛАНОВСКИЙ²

¹ «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации, Мытищи, Россия, e-mail: 32gnii@mail.ru

² Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: mcsak@ya.ru, ikosz@yandex.ru

Рассмотрены состав и принцип построения вторичного эталона единицы энергии пикосекундных импульсов лазерного излучения, перечислены решаемые с его помощью задачи. Приведены результаты измерений энергии коротких импульсов лазерного излучения и оценены составляющие погрешности эталона.

Ключевые слова: лазерное излучение, вторичный эталон.

The composition of secondary standard of the unit of energy of laser radiation picosecond pulses is considered. The principle of secondary standard construction is presented and the solved problems are listed. The results of experimental studies of laser radiation short pulses are presented. The components of error of the standard are listed.

Key words: laser radiation, secondary standard.

В последнее время в промышленности, медицинской технике, а также в сложных технических системах стали применять твердотельные и полупроводниковые лазеры нано- и пикосекундного диапазонов длительностей импульсов. Расширение спектрального диапазона импульсных лазеров и сферы применения все более короткоимпульсного излучения привели к необходимости сертификации и измерительного контроля технических, эксплуатационных и метрологических характеристик лазерных систем, в частности, такого информативного параметра, как энергия лазерного излучения. По мере совершенствования лазерной техники также увеличилась номенклатура и количество выпускаемых средств измерений (СИ) энергии пикосекундных импульсов лазерного излучения (лазерных джоульметров).

До недавнего времени существующая эталонная база не обеспечивала воспроизведение, хранение и передачу единицы энергии лазерного излучения пикосекундной длительности, что осложняло решение задач метрологического обеспечения существующих и перспективных лазерных систем траекторных измерений. Для решения указанной проблемы во ВНИИОФИ разработан и создан вторичный эталон, предназначенный для получения единицы энергии пикосекундных импульсов лазерного излучения от вторичного эталона единиц средней мощности и энергии лазерного излучения, хранения, воспроизведения и передачи единицы энергии пикосекундных импульсов лазерного излучения эталонам низших разрядов и СИ на месте эксплуатации эталона, а также на местах дислокации СИ.

Эталон состоит из стационарного и транспортируемого комплектов. Стационарный комплект обеспечивает аттестацию (поверку) эталонов низших разрядов и СИ на месте эксплуатации эталона и содержит пикосекундный лазерный источник, по ходу излучения которого установлены attenuator (для поверки СИ в различных точках динамического диапазона), диафрагма, расширитель пучка, эталонный изме-

рительный преобразователь лазерного излучения, светоделительная пластина, контрольный преобразователь излучения. Поверяемое СИ устанавливается на место эталонного преобразователя в соответствии с алгоритмом поверки.

Элементы эталона связаны с компьютером. Поверку СИ осуществляют методом последовательного измерения энергии пикосекундного импульса эталонным преобразователем и преобразователем поверяемого средства. В результате определяют его коэффициент преобразования или калибровочное число.

Транспортируемый комплект эталона обеспечивает аттестацию (поверку) СИ на местах эксплуатации лазерных систем с помощью эталонного термоэлектрического преобразователя и контрольного фотоэлектрического СИ энергии пикосекундных импульсов лазерного излучения СИЭПИ-2.

Принцип действия и структурная схема аппаратуры измерений энергии. Основным элементом указанной аппаратуры является эталонный измерительный преобразователь термоэлектрического типа ПИ-П, на основе которого построена функциональная схема вторичного эталона, приведенная на рис. 1.

С учетом описанных требований обеспечения минимально возможных погрешностей выбрана конструкция ПИ-П, представленная на рис. 2. Рассматриваемый ПИ-П содержит чувствительный элемент 5, установленный в массивном блоке 1, размещенном в металлическом корпусе 10. Приемным элементом служит танталовый конус 12, угол при вершине которого равен 15°, а основание имеет диаметр 20 мм. Для уменьшения влияния конвективных потоков перед конусом расположена диафрагма 8. На наружной поверхности приемного конуса намотана обмотка электрического нагревателя 13, выполненная из манганинового провода. Обмотка предназначена для подачи в нее электрической энергии замещения и калибровки ПИ-П. Конус с обмоткой защищен внешним выравнивающим медным конусом 14, к на-

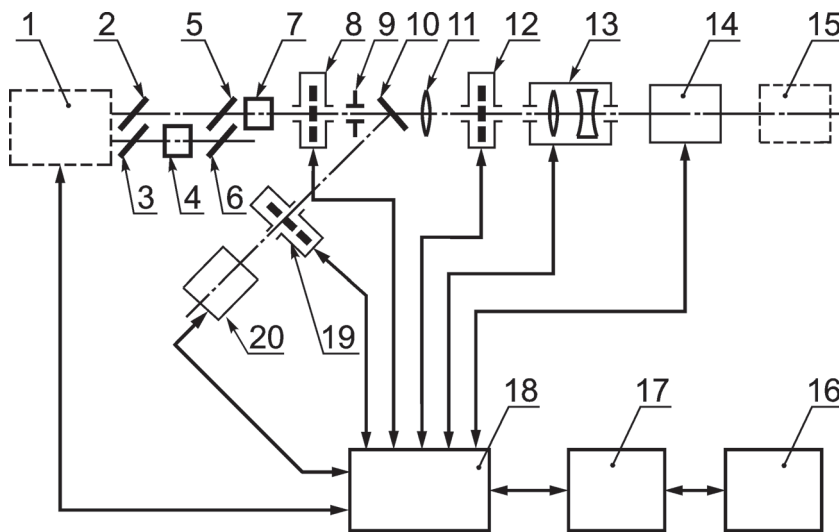


Рис. 1. Функциональная схема вторичного эталона:

1 — пикосекундный лазер; 2, 3, 5, 6 — зеркала; 4 — преобразователь излучения; 7 — лазерный модуль; 8, 12, 19 — аттенюаторы лазерного излучения; 9 — диафрагма; 10 — светоделитель; 11 — линза; 13 — расширитель лазерного пучка; 14 — эталонный термоэлектрический преобразователь энергии пикосекундных импульсов лазерного излучения ПИ-П; 15 — место поверяемого СИ; 16 — устройство вывода на печать; 17 — устройство управления и обработки; 18 — блок управления; 20 — контрольный фотоэлектрический преобразователь

ружной поверхности которого через изоляционную прослойку 15 приклеены восемь секций термобатарей. Каждая секция — это слюдяной каркас 16 с намотанными на нем термобатареями 17.

Работает ПИ-П следующим образом. Измеряемое излучение попадает в приемный конус 5 (12) и нагревает его. Далее теплота через клеевую прослойку и обмотку нагревателя 13 распространяется на выравнивающий конус 14 и через изоляционную прослойку на термобатареи 16, горячие концы которых расположены на конусе 14, а холодные — на корпусе 15.

Термобатареи фиксируют разность температур между выравнивающим конусом 3 (14) и корпусом 4, и с помощью

входного усилителя ВУ (см. рис. 3) сигнал усиливается, преобразуется аналого-цифровым преобразователем АЦП в цифровой код, а микропроцессор МП1 масштабирует и запоминает его максимальное значение. Цифровой сигнал передается по команде на другой вход микропроцессора МП1, который служит для обмена информацией с микропроцессором МП2. Последнему подчиняются индикаторное табло ИТ, панель управления ПУ, также с его помощью происходит в случае необходимости обмен информацией с компьютером по линии связи RS-232. Цифроаналоговый преобразователь ЦАП, управляемый микропроцессором МП1, обеспечивает компенсацию дрейфа измеряемого сигнала при возможных изменениях температуры окружающей среды.

По принципу действия эталонный термоэлектрический преобразователь является инерционным интегрирующим приемником излучения. При работе преобразователя в режиме, в котором не достигается нелинейное поглощение, в диапазоне длительностей лазерного импульса от 1 с до единиц пикосекунд (исследовано экспериментально) форма выходного сигнала преобразователя не зависит от длительности импульса и уровня энергии, поступающей на его вход. Поэтому термоэлектрический преобразователь можно калибровать по максимальному значению амплитуды функции

его отклика. Это подтверждается исследованиями, проведенными ранее и опубликованными в [1]. Представленные экспериментальные результаты показывают корректность метода измерений энергии коротких импульсов лазерного излучения посредством инерционных термоэлектрических преобразователей.

На рис. 4 приведены функции отклика термоэлектрического преобразователя в интервале длительностей импульсов 70 пс — 2 с, полученные во ВНИИОФИ по [1] и дополненные расчетными и экспериментальными данными для длительностей 70 пс, 100 нс, 0,2 с, 0,5 с, 1 с. Из рис. 4 следует, что для конкретного термоэлектрического преобразователя отклика $U(t)$, нормированные на $U_{\max}$ для коротких им-

пульсов (70 пс, 100 нс, 150 мкс) полностью идентичны, поэтому максимальное значение амплитуды проинтегрированного импульса пропорционально энергии входного лазерного импульса.

Метрологические характеристики вторичного эталона и принципы определения его погрешности. Погрешность эталона или погрешность измерения энергии импульса лазерного излучения на входе поверяемого СИ зависит от погрешностей преобразователей ПИ-П, контрольного фотоэлектрического преобразователя (КФП) и принятого способа передачи единицы энергии.

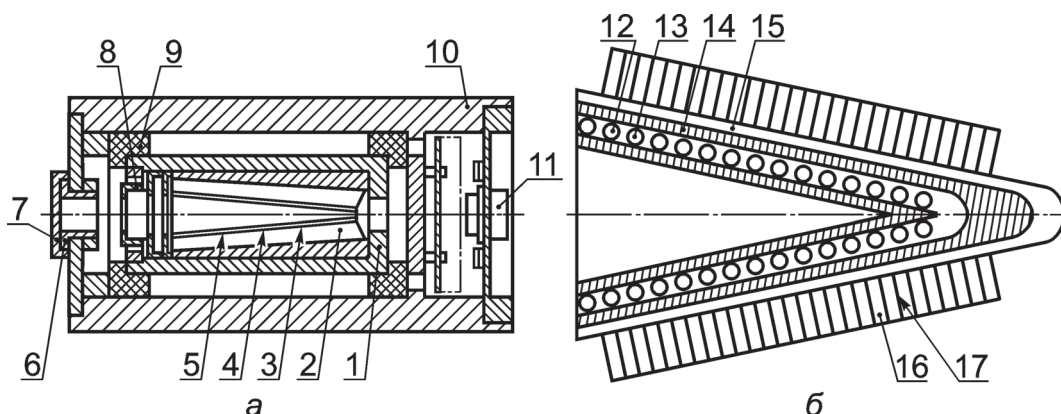


Рис. 2. Конструкция эталонного термоэлектрического преобразователя энергии излучения (а) и чувствительного элемента ПИ-П (б):

1 — массивный корпус; 2, 17 — термобатареи; 3, 14 — выравнивающий конус; 4 — электрический нагреватель; 5, 12 — внутренний приемный танталовый конус; 6 — входное окно; 7 — крышка; 8 — диафрагмы; 9 — изолятор; 10 — внешний корпус; 11 — разъем РС; 13 — обмотка замещения электрического нагревателя; 15 — изоляционная прослойка; 16 — слюдяной каркас

При поверке СИ реализуется метод непосредственного сличения [2]. Вторичный эталон построен с использованием КФП — средства контроля относительного изменения энергии импульсного лазерного излучения, при этом в процессе поверки энергию импульса измеряют одновременно сначала эталонным ПИ-П ($U_{\text{опт1}}$) и КФП ($U_{\text{к1}}$), а затем поверяемым СИ и КФП ($U_{\text{к2}}$).

Энергию импульсного лазерного излучения на входе ПИ-П определяют методом сравнения его выходного сигнала под воздействием импульса лазерного излучения и энергии электрического импульса ($U_{\text{опт}}$, $U_{\text{эл}}$), нахождением эквивалентной электрической энергии $Q_{\text{эл}}$, коэффициента преобразования ПИ-П $A_{\text{эл}}$ от $Q_{\text{эл}}$ и определением $Q_{\text{опт1}}$ в момент времени t_1 по формуле

$$Q_{\text{опт1}} = U_{\text{опт}} / (K_3 A_{\text{эл}}),$$

где K_3 — коэффициент эквивалентности воздействия энергии лазерного импульса и электрической энергии.

Одновременно с измерением $U_{\text{опт}}$ находят выходной сигнал $U_{\text{к1}}$ преобразователя КФП.

После установки (вместо ПИ-П) в оптический тракт эталона преобразователя поверяемого СИ во время t_2 передачи единицы энергии измеряют показания поверяемого СИ и КФП $U_{\text{к2}}$.

Энергию $Q_{\text{опт2}}$ импульсного лазерного излучения на входе поверяемого СИ определяют как

$$Q_{\text{опт2}} = Q_{\text{опт1}} U_{\text{к2}} / U_{\text{к1}}. \quad (1)$$

Из (1) следует, что погрешность эталона состоит из двух независимых составляющих: суммарной погрешности S_Σ измерения энергии $Q_{\text{опт1}}$ и погрешности S_n измерения отношения $U_{\text{к2}}/U_{\text{к1}}$ или погрешности передачи единицы энергии.

Суммарная погрешность эталона S_Σ состоит из погрешностей измерения энергии преобразователем ПИ-П и вышестоящего звена поверочной схемы — вторичного эталона единиц средней мощности и энергии лазерного излучения (ВЭСМЭ). Рассматриваемую погрешность S_Σ определяют в виде среднего квадратического отклонения (СКО) результата измерений энергии при аттестации с ВЭСМЭ:

$$S_\Sigma = \sqrt{S_3^2 + S_n^2 + S_{\text{ПИ-П}}^2 + \sigma_k^2}, \quad (2)$$

где S_3 , S_n — СКО погрешностей воспроизведения единицы энергии ВЭСМЭ и передачи ее вторичным эталонам; σ_k — СКО результата калибровки ПИ-П на ВЭСМЭ; $S_{\text{ПИ-П}}$ — СКО результата измерения энергии с помощью ПИ-П:

$$S_{\text{ПИ-П}} = \sqrt{\sigma_Q^2 + \sigma_{\text{эл}}^2 + \frac{1}{3}(\theta_Q^2 + \theta_{\text{ху}}^2 + \theta_\lambda^2 + \theta_T^2 + \theta_U^2 + \theta_\tau^2 + \theta_{\text{эл}}^2)}, \quad (3)$$

σ_Q , $\sigma_{\text{эл}}$ — СКО результатов измерений коэффициента преобразования ПИ-П по электрической энергии и воспроизведения значения электрической энергии; θ — неисключенные случайные погрешности (НСП), обусловленные уровнем измеряемой энергии θ_Q ; невоспроизводимостью юстировки ПИ-П $\theta_{\text{ху}}$; селективностью приемной полости ПИ-П на рабочих длинах волн θ_λ ; изменением температуры (в нормальных условиях эксплуатации) θ_T ; электронным устройством ПИ-П θ_U ; различием плотностей импульсной мощности при измерениях энергии θ_τ ; воспроизведением электрической энергии, подводимой к обмотке электрического нагревателя ПИ-П $\theta_{\text{эл}}$.

Общепринято считать обоснованной запись формул в виде (2), (3) при соблюдении следующих условий: общее количество составляющих погрешности не менее трех и их зна-

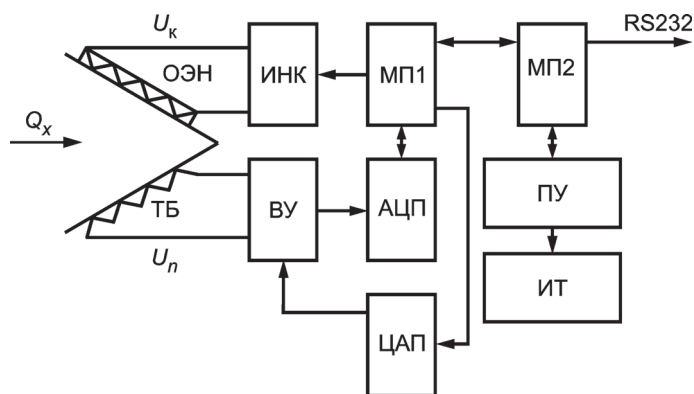


Рис. 3. Функциональная схема ПИ-П:

ОЭН — обмотки электрического нагревателя; ИНК — источник напряжения калибровки; МП1, МП2 — микропроцессоры; ТБ — термобатарей; ВУ — входной усилитель; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь; ИТ — информационное табло; ПУ — панель управления

чения соизмеримы; взаимная корреляция составляющих погрешности отсутствует; закон распределения составляющих погрешности, рассматриваемых как НСП, неизвестен и поэтому считается равномерным; доверительная вероятность равна 0,95.

Вычислим суммарную погрешность ПИ-П:

$$S_\Sigma = 2\sqrt{0,15^2 + 0,15^2 + 0,3^2 + 0,15^2} = 0,78 \%,$$

т. е. соблюдено условие, что $S_\Sigma \leq 2,0 \%$.

Локальная поверочная схема согласована с государственной поверочной схемой для СИ средней мощности и энергии лазерного излучения [3]. Передача единицы энергии пикосекундных импульсов лазерного излучения от вторичного эталона подчиненным СИ проводится в соответствии с локальной поверочной схемой. Государственный эталон единицы энергии пикосекундных импульсов лазерного излучения в настоящее время отсутствует.

Погрешность передачи единицы энергии S_n определяется из соотношения

$$S_n = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \theta_n^2/3},$$

где σ_1 , σ_2 — СКО отношения показаний ПИ-П и КФП до и после поверки СИ; θ_n — НСП, обусловленная различием

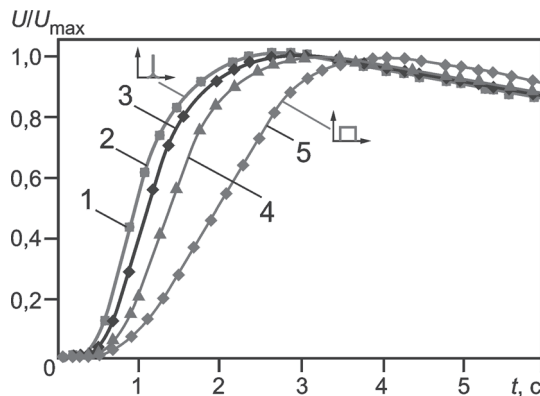


Рис. 4. Изменения во времени выходного сигнала $U(t)$ эталонного термоэлектрического преобразователя, нормированного к максимальному значению U_{max} , при воздействии импульса лазера длительностями 70 пс, 100 нс, 150 мкс (кривая 1), 0,2; 0,5; 1,0; 2,0 с, соответственно кривые 2–5

значений отношений $U_{k1}/Q_{\text{опт1}}$ и $U_{k2}/Q_{\text{опт1}}$ в моменты времени t_1, t_2 ;

$$\sigma_1 = \frac{100}{A_1} \sqrt{\sum_i^n (\bar{A}_1 - A_{1i})^2 / [n(n-1)]},$$

n — число наблюдений, $n=5$; A_{1i} , $\bar{A}_1$ — i -е и среднее значения отношения $U_{k1}/Q_{\text{опт1}}$ в момент времени t_1 ;

$$\sigma_2 = \frac{100}{A_2} \sqrt{\sum_i^n (\bar{A}_2 - A_{2i})^2 / [n(n-1)]},$$

A_{2i} , $\bar{A}_2$ — i -е и среднее значения отношения $U_{k2}/Q_{\text{опт1}}$ в момент времени t_2 .

Значения этой погрешности в диапазоне длин волн 0,35—1,064 мкм не превысили $S_n = 0,5\%$.

Таким образом, решена задача обеспечения единства и точности измерений энергии пикосекундных импульсов ла-

зерного излучения при проведении испытаний, оценке характеристик высокоточных СИ, аттестации (поверки) эталонов низших разрядов и СИ энергии пикосекундных импульсов лазерного излучения (лазерных джоульметров) с помощью вторичного эталона.

Л и т е р а т у р а

1. Mostl K., Brandt F. A New Method to Establish a scale for laser pulse energies // Metrologia. 1991. V. 28. P. 121—124.

2. Мнев И. В., Улановский М. В. Методика поверки рабочего эталона единицы энергии короткоимпульсного лазерного излучения и результаты его опытной эксплуатации // Измерительная техника. 2002. № 6. С. 23—28.

3. ГОСТ 8.275—2007. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений средней мощности лазерного излучения и энергии импульсного лазерного излучения в диапазоне длин волн от 0,3 до 12,0 мкм.

Дата принятия 12.03.2015 г.

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

621.317.08

Алгоритм групповой шкалы времени с использованием скользящего среднего на нескольких временных масштабах

С. Д. ПОДОГОВА¹, К. Г. МИШАГИН^{1, 2}, С. Ю. МЕДВЕДЕВ¹, И. Ю. БЛИНОВ³

¹ ЗАО «Время-Ч», Н. Новгород, Россия, e-mail: podogova@vremya-ch.com

² Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Н. Новгород, Россия, e-mail: mishagin@rf.unn.ru

³ Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: blinov@vniiftri.ru

Предложен новый алгоритм формирования аналитической шкалы времени, учитывающий флуктуации частот сигналов атомных часов на нескольких временных масштабах. С помощью численного моделирования показано, что данный алгоритм позволяет получить групповую шкалу времени ансамбля атомных часов с более высокими характеристиками стабильности частоты. Проведено его сравнение с алгоритмом расчета шкалы времени на основе фильтра Калмана.

Ключевые слова: шкала времени, стандарт частоты и времени, атомные часы, групповой эталон времени и частоты, нестабильность частоты, вариация Аллана.

A new algorithm of analytical time scale formation based on several temporal scales frequency measurements of atomic clocks signals is proposed. It is shown by means of computer modelling that the algorithm allows to get the group time scale with the frequency stability better than of the best standard of ensemble in appropriate range of measuring times intervals. The proposed algorithm is compared with Kalman-based time scale algorithm.

Key words: time scale, frequency and time standard, atomic clock, group standard of time and frequency, frequency instability, Allan variance.

Аналитические шкалы времени широко применяют в эталонах времени и частоты, основанных на ансамблях атомных часов, с целью повышения характеристик точности и стабильности. К настоящему моменту известно большое коли-

чество алгоритмов расчета аналитических шкал времени. Среди них можно выделить алгоритмы, работающие в режиме апостериорной обработки результатов, и алгоритмы, в которых поправки на сигналы атомных часов, составляю-