

Государственный первичный специальный эталон единиц энергии, распределения плотности энергии, длительности импульса и длины волны лазерного излучения

К. Ш. АБДРАХМАНОВ, А. А. ЛИБЕРМАН, С. А. МОСКАЛЮК,
М. В. УЛАНОВСКИЙ

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

Описан государственный первичный специальный эталон единиц энергии, распределения плотности энергии, длительности импульса и длины волны лазерного излучения.

Ключевые слова: энергия, длина волны, распределение плотности энергии, длительность импульса, эталон.

The state primary special standard of units of energy, density of energy, pulse duration and wavelength of laser radiation is described.

Key words: energy, wavelength, energy density distribution, pulse duration, standard.

К числу основных физических величин и параметров, по которым сертифицируют импульсные лазеры, относятся: энергия, совокупность параметров (распределение плотности энергии (РПЭ), угол расходимости, ширина пучка, параметр M^2 и др.), характеризующих качество пучка, длительность импульса, длина волны. В результате развития импульсных лазерных систем и расширения областей их применения становится очевидной необходимость измерять не только энергию импульса лазера, но и параметры качества пучка. Это, в свою очередь, требует решения задачи обеспечения единства измерений параметров лазерного излучения [1] и создания государственной поверочной схемы для средств измерений (СИ) указанных параметров.

Данные СИ входят в состав оборудования, содержащего импульсные лазеры и предназначенного для сварки, резки (раскроя) материала, поверхностного упрочнения, лазерной маркировки, изготовления интегральных микросхем, неразрушающего контроля материалов и готовых изделий. Несотвечание параметров режимов сварки и резки материалов параметрам технологического процесса приводит к появлению брака. Контроль за соблюдением режима обработки особенно важен в авиационной, судостроительной, автомобильной и электронной промышленности. Также указанные СИ используют в медицине в составе терапевтического, хирургического, офтальмологического и дерматологического оборудования в качестве дозаторов энергии и для контроля плотности энергии лазерного излучения.

Возглавляет поверочную схему государственный первичный специальный эталон единиц энергии, распределения плотности энергии, длительности импульса и длины волны лазерного излучения ГЭТ 187—2010, который воспроизводит, хранит и передает единицы рабочим эталонам. В его состав входят комплексы СИ, для каждой единицы свой. Эти комплексы работают почти полностью в автоматическом режиме и имеют широкие функциональные возможности, в частности проведение калибровки по оптической и электри-

ческой энергии в любой точке внутри динамического диапазона и наращивание спектрального диапазона путем агрегатирования конструкции эталона и лазерных модулей.

Рабочие эталоны, как правило, дислоцируют в метрологических центрах и применяют непосредственно для калибровки и поверки находящихся в эксплуатации рабочих СИ. Передача единиц энергии, РПЭ, длительности импульса и длины волны рабочим эталонам и от них рабочим СИ проводится методом прямых измерений величины, воспроизводимой и хранимой государственным или рабочими эталонами, соответственно.

Комплекс СИ для воспроизведения и передачи единицы энергии импульсного лазерного излучения состоит из: аппаратуры измерений энергии лазерного излучения, в состав которой входит эталонный первичный измерительный преобразователь (ЭПИП) и встроенный в него 24-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) ADuC824BS фирмы Analog Devices;

системы калибровки, включающей в себя обмотку замещения, образцовое сопротивление, электронный ключ, конструктивно размещенные на печатной плате, установленной в корпусе ЭПИП;

аппаратуры передачи единицы энергии лазерного излучения, состоящей из сменных импульсных твердотельных лазеров ЛТИ-241, ЛТИ-242, ЛТИ-157 с длинами волн излучения соответственно 1,064; 0,532; 1,570 мкм, блока управления эталонам и оптической системы. Элементы оптической системы — юстировочный лазерный диод ЛМ-6, диафрагма, светоделитель, контрольный измерительный преобразователь, ослабители, расширитель лазерного пучка, механизмы для перестроения режимов работы эталона;

системы управления, регистрации и документирования результатов измерений на базе ПЭВМ с программным обеспечением, работающим в среде Windows XP, и принтера.

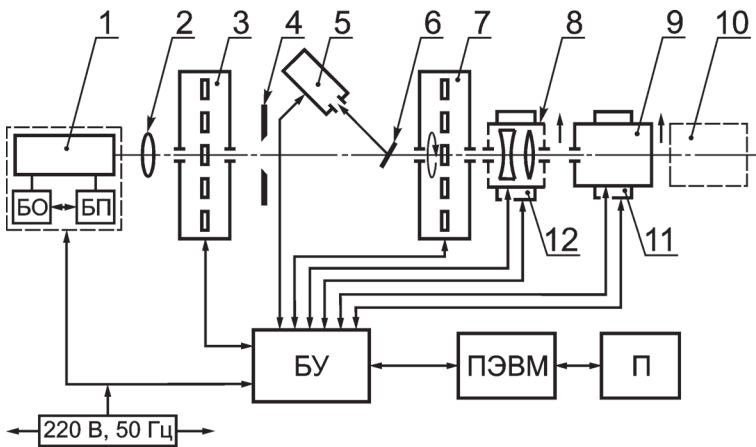


Рис. 1. Структурная схема комплекса СИ для воспроизведения и передачи единицы энергии импульсного лазерного излучения:

1 — сменные лазеры на длинах волн 1,064; 0,532; 1,570 мкм; 2 — линза; 3, 7 — ослабители; 4 — диафрагма; 5 — контрольный преобразователь (датчик относительного уровня энергии); 6 — светоделительная пластина; 8 — расширитель пучка (телескоп); 9 — ЭПИП с АЦП ADuC824BS и устройством электрической калибровки; 10 — поверяемый рабочий эталон единицы энергии; 11, 12 — исполнительные устройства МИ-1; БО — блок охлаждения; БП — блок питания; БУ — блок управления; ПЭВМ — компьютер; П — принтер

Комплекс СИ для воспроизведения и передачи единицы энергии импульсного лазерного излучения функционирует в последовательном варианте. Структурная схема комплекса приведена на рис. 1. Процесс воспроизведения и передачи заключается в последовательной подаче электрической, оптической и вновь электрической энергии в обмотку замещения сначала на рабочий приемник ЭПИП, а затем в той же последовательности на поверяемый рабочий эталон. При этом в процессе воспроизведения по измеренным выход-

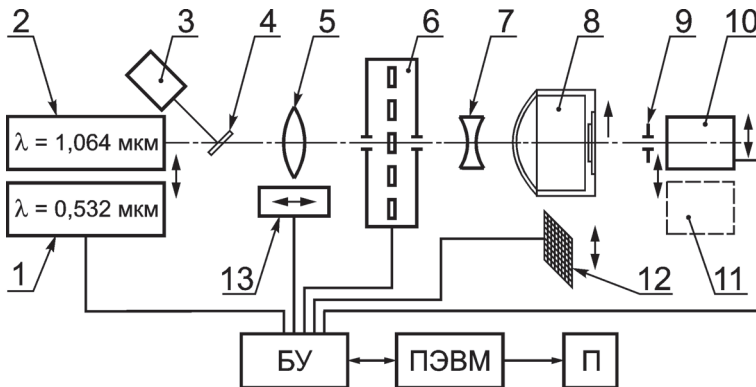


Рис. 2. Структурная схема комплекса СИ для воспроизведения и передачи единицы РПЭ импульсного лазерного излучения:

1, 2 — сменные лазеры на длинах волн 0,532 и 1,064 мкм, соответственно; 3 — датчик относительного уровня энергии; 4 — светоделитель; 5, 7 — длиннофокусная и отрицательная линзы, соответственно; 6 — ослабитель; 8 — оптический формирователь равномерного РПЭ; 9 — калиброванная диафрагма; 10 — ЭПИП с АЦП ADuC824BS и устройством электрической калибровки; 11 — поверяемый рабочий эталон единицы РПЭ импульсного лазерного излучения; 12 — двумерная матрица; 13 — устройство перемещения длиннофокусной линзы; БУ — блок управления; ПЭВМ — компьютер; П — принтер

ным сигналам определяется энергия импульсного лазерного излучения $Q_{\text{опт}}$ при помощи ЭПИП из соотношения

$$Q_{\text{опт}} = \frac{1}{K_d K_3} \left\{ Q_3 + \frac{(V_{\text{опт}} - V_H) - (V_{\text{эл}} - V_H) [1 + \gamma(t_{\text{опт}} - t_{\text{эл}})]}{S_3} \right\}, \quad (1)$$

где K_3 — коэффициент эквивалентности замещения оптической энергии электрической; K_d — коэффициент деления оптического тракта; Q_3 — электрическая энергия, выделяемая в обмотке замещения; $V_{\text{опт}}$, $V_{\text{эл}}$ — выходные сигналы ЭПИП при подаче в его обмотку замещения оптической и электрической энергии, соответственно; V_H — начальное значение выходного сигнала ЭПИП; γ — коэффициент, характеризующий дрейф ЭПИП и системы измерения; S_3 — чувствительность ЭПИП при подаче в его обмотку замещения электрической энергии; $t_{\text{опт}}$, $t_{\text{эл}}$ — моменты времени подачи оптической и электрической энергии.

Значения величин, входящих в (1), находят путем обработки большого массива информативных данных. В результате проведенных метрологических исследований неисключенная систематическая погрешность (НСП) результата косвенного измерения энергии лазерного излучения при помощи комплекса $\Theta_Q = 0,22 \%$. Среднее квадратическое отклонение (СКО) результата измерения энергии импульсного лазерного излучения $S_Q = 0,17 \%$.

При использовании последовательного варианта погрешность передачи единицы обусловлена случайными изменениями за время передачи параметров элементов аппаратуры. Основными из них являются случайные изменения параметров оптической системы (делительной пластины и формирующей оптики), выходного сигнала датчика относительного уровня энергии излучения, не коррелированные с изменениями энергии на его входе; нестабильность энергии лазерного излучения от импульса к импульсу.

В результате проведенных метрологических исследований погрешность передачи единицы энергии составила $S_{\Sigma} \leq 0,2 \%$; стандартные неопределенности воспроизведения и передачи единицы энергии по типам А, В соответственно — $u_A^B(Q) \approx 0,22 \%$, $u_A^A(Q) \approx 0,25 \%$, $u_B^B(Q) \leq 0,27 \%$, $u_B^A(Q) \leq 0,33 \%$; суммарные стандартные неопределенности воспроизведения и передачи единицы энергии — $u_C^B(Q) \leq 0,34 \%$, $u_C^A(Q) \leq 0,41 \%$.

Комплекс СИ для воспроизведения и передачи единицы РПЭ импульсного лазерного излучения. Структурная схема комплекса приведена на рис. 2. Основные составляющие данного комплекса:

аппаратура воспроизведения и измерений единицы РПЭ, состоящая из оптического гомогенизатора, отрицательной линзы, ЭПИП с АЦП ADuC824BS, устройства электрической калибровки и калиброванной диафрагмы; аппаратура передачи единицы РПЭ, состоящая из импульсных твердотельных лазеров ЛТИ-241, ЛТИ-242 с длинами волн излучения соответственно 1,064; 0,532 мкм и непрерывного He—Ne-лазера ГН-5 с длиной волны 0,6328 мкм, оптической системы и двумерной матрицы; система управления, регистрации и документирования результатов измерений на базе ПЭВМ с программ-

ным обеспечением, работающим в среде Windows XP, и принтера.

Применение импульсных лазеров зависит от данных о РПЭ $H(x, y)$ в поперечном сечении пучка как в ближней, так и в дальней зонах. РПЭ лазерного пучка характеризуется пространственным распределением плотности излучаемой энергии, получаемой экспериментально с использованием двумерной матрицы с высоким пространственным разрешением, а также является основной интегральной характеристикой поля излучения импульсных лазеров. По РПЭ вычисляют все производные величины, например угол расходимости, ширину пучка, параметр M^2 и др.

Из результатов исследований импульсных лазеров [2] следует, что задача формирования эталонных импульсов излучения с нормированным РПЭ, обладающих достаточной воспроизводимостью и энергетическим уровнем, на современном этапе развития лазерной техники является исключительно сложной по ряду технологических причин. В связи с этим, очевидно, что ни один из существующих типов импульсных лазеров не может с достаточной степенью точности воспроизводить, хранить и передавать единицы РПЭ. Поэтому комплекс СИ для воспроизведения единицы РПЭ импульсного лазерного излучения в составе ГЭТ 187—2010 базируется на ЭПИП калориметрического типа с калиброванной диафрагмой на входе. При передаче единицы РПЭ используется двумерная матрица приемников с высоким пространственным разрешением, малыми значениями взаимовлияния элементов (пикселей), высокой стабильностью чувствительности и линейностью.

В качестве источников излучения (компараторов) в системе передачи единицы РПЭ используют стабилизированные импульсные твердотельные лазеры, имеющие достаточный энергетический уровень и произвольный характер РПЭ. Работа комплекса СИ в режиме передачи осуществляется в два этапа: калибровка приемника рабочего эталона по плотности энергии; комплектная калибровка матриц рабочих эталонов или СИ РПЭ на реальном распределении излучения лазера ГЭТ 187—2010 в дальней зоне излучения.

Процесс воспроизведения и передачи единицы РПЭ заключается в формировании однородного двумерного РПЭ импульсного лазерного излучения в поперечном сечении пучка и пространственной калибровке с определением плотности энергии этого распределения по координатам x, y в сечении пучка при помощи ЭПИП, имеющего на входе калиброванную диафрагму и сканирующее устройство. В процессе воспроизведения по измеренным выходным сигналам ЭПИП определяется РПЭ лазерного излучения из соотношения

$$H(x, y) = H(x, y, z_0) (1 + \alpha) = Q_{\text{опт}} (1 + \alpha) / S_{\text{д}} = \\ = V_{\text{опт}} (1 + \alpha) / (K_{\text{д}} K_{\text{э}} K_{\text{эл}} S_{\text{д}}), \quad (2)$$

где $H(x, y, z_0)$ — плотность энергии в сечении пучка с координатой z_0 ; α — коэффициент, характеризующий неоднородность воспроизводимого распределения; $S_{\text{д}}$ — площадь калиброванной диафрагмы; $K_{\text{эл}}$ — коэффициент преобразования ЭПИП по электрической энергии.

Реализация такой системы возможна при использовании источников лазерного излучения, ЭПИП калориметрического типа с калиброванной диафрагмой на входе, оптического формирователя равномерного РПЭ [3], гарантирующих

работу в динамическом диапазоне $1 \cdot 10^{-4} — 1 \cdot 10^{-2}$ Дж/см² [1], соответствующих алгоритмов воспроизведения единицы и обработки результатов наблюдений, позволивших реализовать учет неоднородности РПЭ в поперечном сечении лазерного пучка на уровне 0,5 %, что достигается использованием специальной оптической системы и оптического формирователя, выполненного в виде диффузно пропускающего линзового элемента и диффузно отражающего цилиндра, в выходной плоскости которого формируется однородное РПЭ.

В результате проведенных метрологических исследований было установлено, что НСП результата измерения РПЭ лазерного излучения при помощи комплекса составила $\Theta_{H(x, y)} = 0,44$ %. Среднее квадратическое отклонение результата измерения РПЭ импульсного лазерного излучения $S_{H(x, y)} = 0,4$ %. В этом случае погрешность передачи единицы РПЭ также обусловлена случайными изменениями за

время передачи и составила $S_{\epsilon\Sigma} \leq 0,5$ %, стандартные неопределенности воспроизведения и передачи единицы РПЭ по типам А, В — $u_{\text{А}}^{\text{В}}(H(x, y)) \approx 0,65$ %, $u_{\text{А}}^{\text{П}}(H(x, y)) \approx 0,5$ %,

$u_{\text{В}}^{\text{В}}(H(x, y)) \leq 0,82$ %, $u_{\text{В}}^{\text{П}}(H(x, y)) \approx 0,6$ %; суммарные стандартные неопределенности — $u_{\text{С}}^{\text{В}}(H(x, y)) \leq 1,1$ %; $u_{\text{С}}^{\text{П}}(H(x, y)) \leq 0,78$ %.

Комплекс СИ для воспроизведения и передачи единицы длительности импульса лазерного излучения. Комплекс, структурная схема которого представлена на рис. 3, состоит из:

аппаратуры воспроизведения единицы длительности импульса лазерного излучения, в которую входят образцовый генератор временных интервалов Textronix AFG 3251, двухканальный АЦП — осциллограф LeCroy 204Xi, устройство сбора данных;

аппаратуры передачи единицы длительности импульса лазерного излучения СИ длительности импульса, состоящей из задающего пикосекундного лазера Fianium 300fs, оптического формирователя временных интервалов, оптоволоконного ввода, ослабителя, приемника Newport D-15 Detector, делителя, двухканального АЦП — осциллографа LeCroy 204Xi и устройства сбора данных;

аппаратуры поверки (калибровки) источников лазерного излучения по длительности импульса лазерного излучения, в которую входят оптоволоконный ввод, ослабитель, приемник Newport D-15 Detector, делитель, двухканальный АЦП — осциллограф LeCroy 204Xi, устройство сбора данных;

системы управления и регистрации результатов измерений на базе ПЭВМ.

Принцип действия комплекса СИ при воспроизведении единицы длительности импульса основан на подаче электрического сигнала частотой $f = 200$ МГц от образцового генератора временных интервалов Textronix AFG 3251 через делитель на два входа осциллографа. Таким образом, электрический импульс от генератора длительностью $\tau = 1/f = 5$ нс подается на временную шкалу осциллографа, что позволяет прокалибровать ее с разрешением 50 пс. Такую операцию проводят каждый раз перед началом процедуры воспроизведения и передачи единицы длительности импульса лазерного излучения.

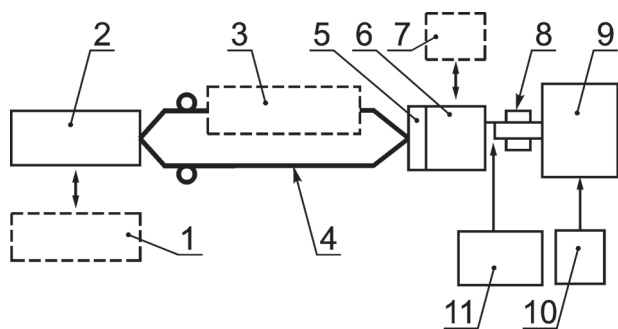


Рис. 3. Структурная схема комплекса СИ для воспроизведения и передачи единицы длительности импульса лазерного излучения:

1 — исследуемый лазер; 2 — задающий пикосекундный лазер Fianium 300fs; 3 — оптический формирователь временных интервалов; 4 — оптоволоконный ввод; 5 — ослабитель; 6 — приемник Newport D-15 Detector; 7 — поверяемое (калибруемое) СИ; 8 — делитель; 9 — двухканальный АЦП — осциллограф LeCroy 204Xi; 10 — компьютер сбора данных; 11 — задающий генератор временных интервалов Tectronix AFG 3251

Принцип действия комплекса СИ при передаче единицы длительности импульса основан на использовании оптического формирователя, при помощи которого формируются два импульса, сдвинутые относительно друг друга. Этот сдвиг определяется по дополнительному проходу одного луча лазерного излучения относительно другого и может регулироваться.

При передаче единицы длительности импульса лазерного излучения (поверке, калибровке) СИ длительности импульса лазерного излучения световой поток от лазера 2 (см. рис. 3) через оптический формирователь 3, оптоволоконный ввод 4 и ослабитель 5 подается на вход приемника 6, при помощи которого измеряется интервал времени между двумя импульсами, сдвинутыми относительно друг друга. Этот интервал времени регистрируется осциллографом 9. Перед измерениями с использованием генератора временных интервалов 11 проводится калибровка временной шкалы осциллографа с погрешностью не более 50 пс. Длительность строго фиксированного временного интервала измеряют 10 раз и по результатам измерений вычисляют СКО. Затем на место приемника 6 устанавливают поверяемое СИ и измеряют этот же временной интервал, тем самым проводится поверка его шкалы. Измерения также проводят 10 раз и вычисляют СКО.

Погрешность воспроизведения вычисляется путем суммирования погрешностей результатов прямых измерений длительности импульса, подаваемого от генератора временных интервалов и измеряемого осциллографом. Эти составляющие погрешности являются НСП и их значения указаны в паспортах приборов. Кроме того, при расчете погрешности воспроизведения единицы учитывается СКО, которое получено по результатам 10 измерений длительности электрического импульса.

В результате проведенных метрологических исследований были получены следующие значения: погрешности воспроизведения и передачи единицы длительности импульса соответственно составили $S_{\Sigma t}^B = 0,074 \%$, $S_{\Sigma t}^N = 1,025 \%$; стан-

дартные неопределенности воспроизведения и передачи единицы длительности импульса по типам А, В — $u_A^B(\tau) \approx 0,037 \%$, $u_A^N(\tau_\epsilon) = 0,98 \%$, $u_B^B(\tau) \approx 0,16 \%$, $u_B^N(\tau_\epsilon) \leq 0,30 \%$; суммарные стандартные неопределенности воспроизведения и передачи единицы длительности импульса — $u_C^B(\tau) \leq 0,16 \%$, $u_C^N(\tau_\epsilon) \leq 1,02 \%$.

Комплекс СИ для воспроизведения и передачи единицы длины волны лазерного излучения. Данный комплекс СИ работает в трех режимах:

воспроизведения единицы длины волны лазерного излучения;

передачи единицы длины волны лазерного излучения (поверка, калибровка) СИ длины волны лазерного излучения;

поверки (калибровки) источников лазерного излучения по значению длины волны.

В соответствии с назначением комплекса его структурная схема, представленная на рис. 4, состоит из:

аппаратуры воспроизведения единицы длины волны лазерного излучения, в которую входят: He—Ne-лазер 117А фирмы Spectra-Physics, получающий единицу от государственного первичного эталона длины — метра ГЭТ 2—85 (хранится во ВНИИМ) с длиной волны $\lambda = (632,990096 \pm 2 \cdot 10^{-6})$ нм в соответствии со свидетельством о поверке № H2511-7-1045/10, СКО $\sigma = 6 \cdot 10^{-7}$ нм, НСП $\theta = 8 \cdot 10^{-7}$ нм; волоконная и фокусирующая оптика; блок коммутации и прецизионный оптоволоконный CCD-спектрометр, используемый в спектральном диапазоне 524—645 нм (дифракционная решетка 1800 лин/мм, 3648 пикселей, детектор CCD TOSHIBA3648 с нанесенным фильтр-покрытием для подавления волн второго порядка);

аппаратуры передачи единицы длины волны лазерного излучения (поверка, калибровка) СИ длины волны лазерного излучения, состоящей из лазеров с длинами волн 0,532 и 1,064 мкм (Verdi-8 и COMPASS 1064-4000 из состава государственного первичного эталона единицы средней мощности лазерного излучения ГЭТ 28—2009), мультиканального спектрометра Avantes Multichannel (спектральные диапазоны 528—645 нм и 956—1100 нм), волоконной и фокусирующей оптики, аттенюатора и блока коммутации;

аппаратуры сертификации (испытаний) источников лазерного излучения по значению длины волны, в которую входят: лазеры Verdi-8 и COMPASS 1064-4000; волоконная и фокусирующая оптика; аттенюатор; блок коммутации; блок калибровочных широкополосных источников, состоящий из калибровочных источников (UV/VIS Avantes AvaLight-CAL HgAr 254-922 nm Spectral calibrated light source; VIS/NIR Avantes AvaLight-CAL Ar 696-1704 nm Spectral calibrated light source; CC-VIS/NIR Avantes AvaLight-HAL-CAL Halogen 350-1095/1950 nm source; спектрометров 570-1070 нм OPHIR Wavestar-V и 360-625 нм OPHIR Wavestar-U);

системы управления и регистрации результатов измерений на базе ПЭВМ.

Принцип действия эталона основан на использовании в качестве эталонного высокостабилизированного по частоте и выходной мощности лазерного излучения He—Ne-лазера 117А. Воспроизведение единицы проводится при помощи этого же лазера, который стабилизирован по частоте (нестабильность $6 \cdot 10^{-7} \%$) и длине волны (нестабильность $6,3 \cdot 10^{-7} \%$). Формулу воспроизведения длины волны лазерного излучения получим из отношения скорости света c к средней частоте f_m оптического излучения: $\lambda_m = cf_m$.

Средняя частота f_m оптического излучения может быть измерена непосредственно, например, при передаче единицы от государственного эталона длины.

При воспроизведении единицы излучение от He—Ne-лазера 3 (см. рис. 4) через волоконный разветвитель 4, аттенюатор 7 и блок коммутации 11 подается на вход мультисканального спектрометра 12 (канал 528—645 нм), при помощи которого измеряется длина волны лазера с погрешностью не более 0,01 нм.

При передаче единицы длины волны лазерного излучения (поверка, калибровка) СИ длины волны лазерного из-

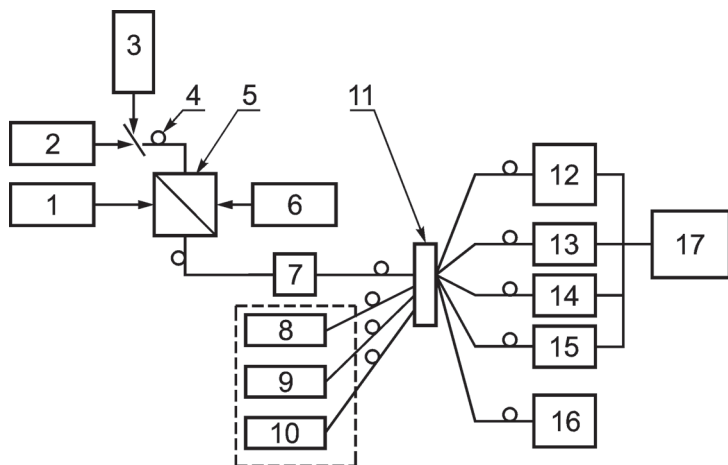


Рис. 4. Структурная схема комплекса СИ для воспроизведения и передачи единицы длины волны лазерного излучения:

1 — He—Ne-лазер модели 117А фирмы Spectra-Physics с длиной волны 0,632 мкм; 2, 3 — стабилизированные лазеры Verdi-8 и COMPASS 1064-4000 на длинах волн 0,532 и 1,064 мкм; 4 — оптоволоконный разветвитель; 5 — куб-призма; 6 — исследуемый лазер; 7 — аттенюатор; 8, 9, 10 — высокостабильные спектральные лампы Avantes AvaLight-CAL HgAr (254—922 нм), Avantes AvaLight-CAL Ar (696—1704 нм), Avantes AvaLight-HAL-CAL Halogen (350-1095/1950 нм), соответственно; 11 — блок коммутации; 12 — мультисканальный спектрометр Avantes Multichannel Spectrometer (каналы 956—1100 нм и 528—645 нм); 13, 14 — спектрометры OPHIR Wavestar-V (570—1070 нм) и OPHIR Wavestar-U (360—625 нм); 15 — поверяемое (калибруемое) СИ длины волны лазерного излучения; 16 — СИ средней мощности; 17 — компьютер

лучения излучение от лазеров 1, 2, 3 через волоконный разветвитель 4, аттенюатор 7 и блок коммутации 11 подается на вход мультисканального спектрометра 12 (каналы 528—645 нм и 956—1100 нм).

Погрешность воспроизведения определяется суммированием погрешностей результатов прямых измерений длины волны лазерного излучения, генерируемой He—Ne-лазером 117А и регистрируемой мультисканальным спектрометром (канал 528—645 нм). Составляющие погрешности мультисканального спектрометра являются НСП и их значения берут из паспорта прибора. Кроме того, при расчете погрешности воспроизведения единицы учитывается СКО, рассчитанное по результатам 10 измерений длины волны лазерного излучения.

В результате проведенных метрологических исследований было установлено, что погрешности воспроизведения и передачи единицы длины волны $S_{\Sigma\lambda}^B = 4,85 \cdot 10^{-6}$, $S_{\Sigma\lambda}^N = 1,21 \cdot 10^{-5}$; стандартные неопределенности воспроизведения и передачи единицы длины волны по типам А, В — $u_A^B(\lambda) \approx 4,74 \cdot 10^{-6}$, $u_A^N(\lambda_\epsilon) \leq 1,2 \cdot 10^{-5}$, $u_B^B(\lambda) \approx 1,61 \cdot 10^{-6}$, $u_B^N(\lambda_\epsilon) \leq 1,86 \cdot 10^{-6}$; суммарные стандартные неопределенности воспроизведения и передачи единицы длины волны — $u_c^B(\lambda) \leq 5,06 \cdot 10^{-6}$, $u_c^N(\lambda_\epsilon) = 1,21 \cdot 10^{-5}$.

Заключение. Государственный первичный специальный эталон обеспечивает воспроизведение и хранение единиц энергии, относительного распределения плотности энергии, длительности импульса и длины волны лазерного излучения и передачу единиц при помощи рабочих эталонов в диапазоне длин волн 0,3—2,0 мкм рабочим СИ, применяемым в народном хозяйстве России с целью обеспечения единства измерений в стране.

Литература

- ГОСТ Р 8.780—2012. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений энергии, распределения плотности энергии, длительности импульса и длины волны лазерного излучения в диапазоне длин волн от 0,3 до 2,0 мкм.
- William T. Silfvast Laser Fundamentals. N. Y.: Cambridge Univ. Press, 1996.
- Абдрахманов К. Ш., Райцин А. М. Диффузный формирователь равномерного распределения интенсивности в поперечном сечении пучка лазерного излучения // Измерительная техника. 2013. № 1. С. 33—38; Abdrakhmanov K. Sh., Raitsin A. M. Diffuse Shaper of Uniform Intensity Distribution in a Laser Radiation Beam Cross-Section // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N 1. P. 46—53.

Дата принятия 08.07.2013 г.