



УДК 535.231.11

Создание национального эталона единиц средней мощности и энергии лазерного излучения Республики Беларусь

В. А. Длугунович, Д. О. Дунец, А. В. Исаевич, Е. А. Круплевич,
Л. Н. Насенник

Государственное научное учреждение "Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси", пр. Независимости, 68–2, 220072, Минск, Республика Беларусь
e.kruplevich@dragon.bas-net.by

Аннотация

Статья посвящена созданию национального эталона единиц средней мощности и энергии лазерного излучения Республики Беларусь.

До недавнего времени хранение, воспроизведение и передачу единицы средней мощности лазерного излучения рабочим средствам измерений мощности излучения обеспечивал исходный эталон единицы средней мощности лазерного излучения Республики Беларусь ИЭ РБ 10–06, метрологические возможности которого не удовлетворяют возрастающим потребностям производителей и потребителей современной лазерной техники.

Рассмотрены оптическая схема, состав и алгоритмы работы создаваемого эталона, а также неопределенности воспроизведения единицы средней мощности лазерного излучения с помощью эталонного измерительного преобразователя ПИ-15, входящего в состав эталона.

Создаваемый эталон должен обеспечивать воспроизведение и хранение в спектральном диапазоне от 0,2 до 10,6 мкм единицы средней мощности лазерного излучения в динамическом диапазоне от 10^{-9} до 2 Вт с относительной стандартной неопределенностью, не превышающей 0,07 %, и единицы энергии лазерного излучения в диапазоне от 10^{-9} до 1 Дж с неопределенностью не более 0,5 %, а также передачу единицы средней мощности на длинах волн 0,532; 0,808; 1,064 и 10,6 мкм и единицы энергии на длинах волн 0,532; 0,808; 1,064 мкм.

Представлены результаты исследования метрологических характеристик эталона при воспроизведении единицы средней мощности лазерного излучения, в ходе проведения которых выполнялась оценка точности воспроизводимых значений средней мощности лазерного излучения, коэффициента преобразования средней мощности электрического тока, коэффициента эквивалентности замещения, а также влияние на точность воспроизведения единицы средней мощности лазерного излучения таких факторов, как уровни мощности, параметры окружающей среды, стабильность источников излучения, погрешности применяемых средств измерений.

Полученное в результате проведенных исследований среднее значение коэффициента преобразования средней мощности электрического тока K_3 находится в пределах $5,10 \pm 0,01$ мВ/Вт. Относительная суммарная стандартная неопределенность воспроизведения единицы средней мощности лазерного излучения при воспроизведении единицы средней мощности с помощью преобразователя ПИ-15 не превышает 0,024 %.

Ключевые слова: национальный эталон, средняя мощность, энергия, лазерное излучение, калибровка.

Получено: 19.12.2018

Отредактировано: 27.12.2018

Одобрено к печати: 28.12.2018

Введение

В настоящее время рынок лазерной и опто-электронной техники стремительно растет и имеет широкий спектр областей применения, включающих энергетику, агропромышленное производство, промышленность и строительные технологии, медицину и фармацевтику, био- и наноиндустрию,

авиакосмические технологии, рациональное природопользование, национальную безопасность. Для его развития необходимо современное метрологическое обеспечение, основанное на современной эталонной базе, основой которого является точность воспроизведения, хранения и передачи соответствующим средствам измерений (СИ) размеров

единиц и в первую очередь основных энергетических величин — мощности и энергии излучения.

До недавнего времени хранение, воспроизведение и передачу единицы средней мощности лазерного излучения (ЛИ) вторичным, рабочим эталонам и СИ мощности ЛИ обеспечивал исходный эталон единицы средней мощности лазерного излучения Республики Беларусь (ЭСМЛИ), внесенный в Государственный реестр национальных и исходных эталонов Республики Беларусь за № ИЭ РБ 10–06.

Основные метрологические характеристики ЭСМЛИ: фиксированные длины волн воспроизведения единицы средней мощности ЛИ 0,532 и 10,6 мкм; динамический диапазон воспроизведения единицы средней мощности ЛИ от 0,05 до 1,3 Вт, среднее квадратическое отклонение (СКО) воспроизведения единицы средней мощности ЛИ не более 0,4 %; погрешность передачи размера единицы поверяемым (калибруемым) СИ, выраженная в виде СКО, не более 0,5 %.

В настоящее время метрологические возможности ЭСМЛИ не удовлетворяют возрастающим потребностям производителей и потребителей современной лазерной техники. Проведение калибровки (поверки) СИ по мощности и энергии ЛИ в других государствах обходится дорого и требует привлечения больших валютных средств. В связи с этим возникла необходимость создания национального эталона единиц средней мощности и энергии ЛИ Республики Беларусь (ЭСМЭЛИ).

Анализ литературных данных

Анализ основных направлений совершенствования эталонов за рубежом показал, что в ряде европейских стран национальные эталоны единицы мощности ЛИ создают на основе абсолютного криогенного радиометра, “привязывая” к нему фото- и радиометрические шкалы в области широкополосного оптического излучения. Несмотря на высокую точность воспроизведения единицы мощности оптического излучения, криогенные радиометры имеют два существенных недостатка — очень высокую стоимость как их создания, так и обслуживания, и ограниченный динамический диапазон воспроизведения единицы мощности оптического излучения, находящийся в пределах нескольких микроватт, в то время как лазеры в большинстве областей применения имеют мощности излучения на много порядков большие.

Обзор зарубежных публикаций по методам прецизионных измерений мощности (энергии) ЛИ показывает, что в настоящее время калориметрический метод является единственно приемлемым при воспроизведении размера единицы с наивыс-

шей точностью. К аналогичным выводам приводят опубликованные результаты международных сличений эталонов США, Великобритании, России и Германии [1]. Поэтому в созданном эталоне используется измерительный преобразователь калориметрического типа с замещением мощности оптического излучения мощностью электрического тока.

Описание схемы эталона

Структурная схема ЭСМЭЛИ для воспроизведения и передачи единиц средней мощности и энергии ЛИ представлена на рис. 1.

При работе эталона в режиме передачи единицы средней мощности ЛИ излучение одного из лазерных источников 1, 2, 3 или 10 блока излучателей с помощью поворотных зеркал 11, 12, 13, выставляемых ПО в нужное положение блоком автоматизированных платформ (площадками 16, 17, 18), сначала направляется на эталонный измерительный преобразователь ПИ-1541 либо на трап-детектор 42 (в этом случае вместо зеркала 11 используются зеркало 15 и аттенуатор 36), а затем на калибруемое СИ (КСИ) 40, которое устанавливается на место ЭИП путем перемещения площадки 39 блока автоматизированных платформ.

Часть излучения от светоделительной пластинки 28 подается на приемник-“свидетель” 25, который используется для оценки уровня мощности и контроля стабильности мощности ЛИ, поступающего на приемники излучения при их последовательной замене. Сигналы с ПИ-15, трап-детектора и приемника-“свидетеля” с помощью нановольтметра 49 через блок измерений и управления эталоном (БИУЭ) 50, выполняющего обработку сигналов и осуществляющего управление работой эталона, подаются на персональный компьютер (ПК) 51.

При воспроизведении и передаче единицы энергии ЛИ в измерительный канал с помощью блока автоматизированных платформ (площадка 23) вводится один из оптико-механических затворов (ОМЗ) 20, или 21, или 22. Каждый ОМЗ предназначен для работы на определенной длине волны излучения (0,532; 0,808; 1,064 мкм), соответствующей длине волны излучения лазеров 2, 3 и 10. С помощью блока управления ОМЗ 27 и внешнего генератора 44 ОМЗ формируют импульсы ЛИ длительностью от 10 мкс до 10 с с частотой следования импульсов от 0 до 100 кГц. Характеристики импульсов излучения контролируются с помощью отдельного канала, создаваемого светоделительной пластинкой 30, которая вводится в измерительный канал площадкой 31, от которой часть излучения направляется на оптоэлектрический преобразователь FPS-1 26. Длительность и частота следования импульсов с преобразователя FPS-1 измеряются с помощью частотомера 32.

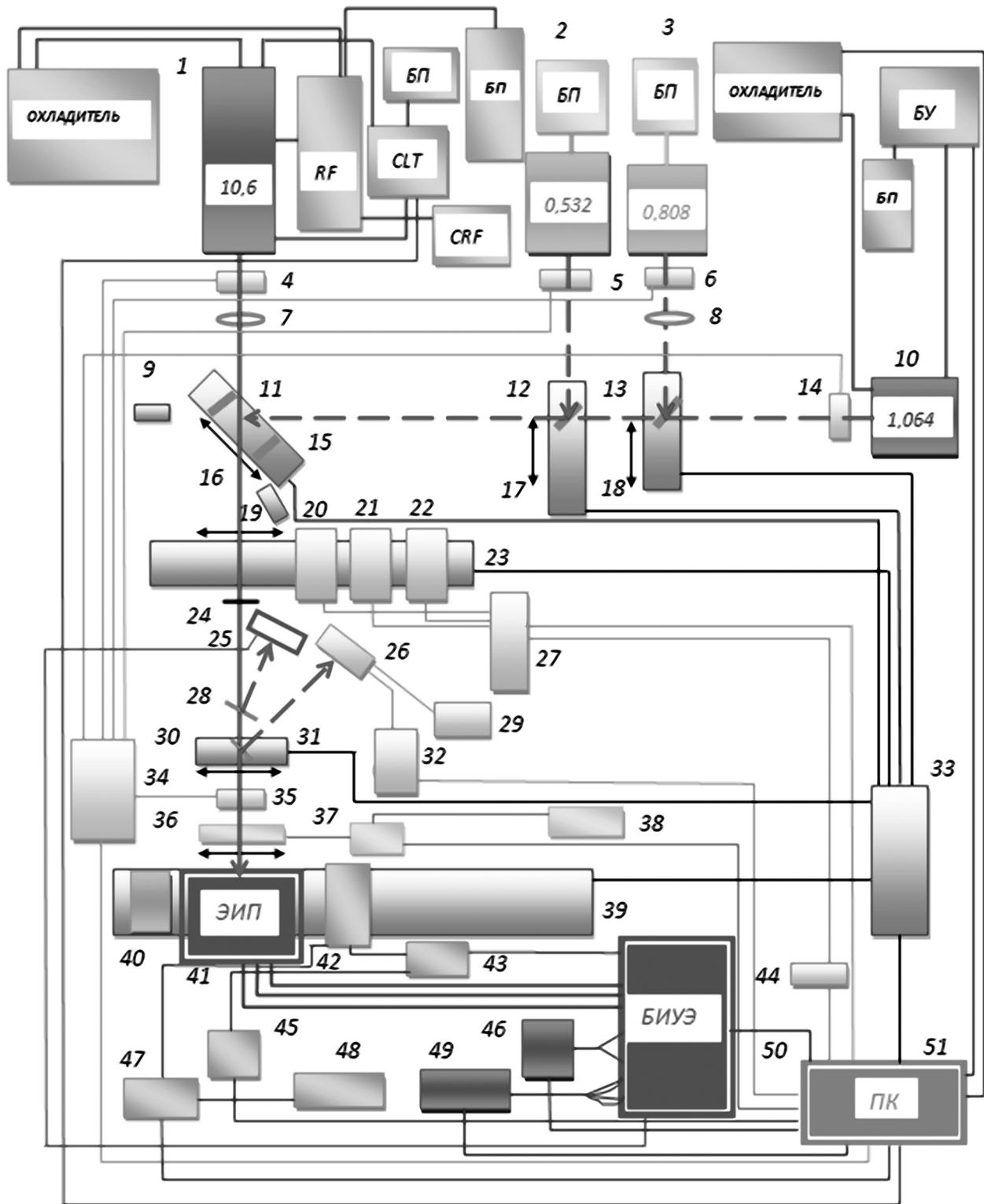


Рис. 1. Схема ЭСМЭЛИ: 1, 2, 3, 10 — источники ЛИ; 4, 5, 6, 14, 35 — автоматизированные заслонки с блоком управления 34; 7, 8 — фокусирующая оптика; 9, 19 — ловушки ЛИ; 11, 12, 13, 15 — поворотные зеркала, 16, 17, 18, 23, 31, 39 — автоматизированные платформы с блоком управления 33; 20, 21, 22 — электрооптические затворы с блоком управления 27; 24 — диафрагма; 25 — приемник-«свидетель»; 26 — FPS-1 с блоком питания 29; 28, 30 — светоделительные пластинки; 32 — частотомер; 36 — аттенюатор с контроллером 37 и блоком питания 38; 40 — КСИ; 41 — ЭИП; 42 — трап-детектор с усилителем 43, источником питания усилителя 45, контроллером температуры 47, блоком питания контроллера температуры 48; 44 — генератор; 46 — блок электрической калибровки ЭИП; 49 — нановольтметр; 50 — БИУЭ; 51 — ПК; БП — блоки питания лазеров; БУ — блок управления лазера; RF — генератор импульсов возбуждения; CRF — блок управления генератора; CLT — блок управления системы стабилизации лазера

Основой ЭСМЭЛИ является эталонный первичный калориметрический измерительный преобразователь средней мощности оптического излуче-

ния ПИ-1541, специальная конструкция приемного элемента которого позволила минимизировать не контролируемые термобатареей тепловые потери

с поверхности его приемного элемента в окружающую среду, обусловленные теплопроводностью, конвекцией и излучением, и достичь высокой эквивалентности этих минимизированных потерь при воздействиях на преобразователь оптического излучения и постоянного электрического тока.

Для уменьшения влияния на работу преобразователя внешних тепловых помех он снабжен вторым приемным элементом (компенсационным), конструкция которого полностью аналогична рабочему. При этом термобатарей рабочего и компенсационного элементов включены по дифференциальной схеме, т. е. навстречу друг другу. Оба приемных элемента преобразователя в равной степени защищены от возникающих в окружающей среде внешних тепловых помех общим пассивным термостатом, окружающими его воздушным зазором, теплоизолирующими оболочками, а также теплоизолирующим наружным корпусом. Этим обеспечивается эффективное подавление случайных погрешностей измерений. Коэффициент преобразования средней мощности оптического излучения составляет порядка 5 мВ/Вт, а время формирования выходного сигнала не превышает 5 мин.

ЭСМЭЛИ работает по методу замещения, т. е. необходимая точность измерений мощности оптического излучения достигается путем замещения последней мощностью электрического тока, которая при калибровке ЭСМЭЛИ измеряется с высокой точностью. Система калибровки включает в себя стабилизированный источник электрического тока — блок электрической калибровки 46, цифровой нановольтметр Keysight 34420A 49 для измерений напряжения калибровки U и силы тока I , путем измерения падения напряжения на эталонном сопротивлении 100 Ом.

При электрической калибровке в эталонном калориметрическом преобразователе ПИ-1541 происходит последовательное преобразование сначала выделяемой в его электрическом нагревателе мощности электрического тока $P_э$ в тепловой поток, а затем в его термобатарее в аналоговый выходной электрический сигнал $V_э$, пропорциональный средней мощности образованного теплового потока. Этот сигнал измеряют с помощью нановольтметра 49 и определяют текущее значение коэффициента преобразования средней мощности электрического тока $K_э$:

$$K_э = V_э / P_э = V_э / U \cdot I. \quad (1)$$

Отключив источник электрического тока, подают в ПИ-1541 излучение от источника оптического излучения. В приемном элементе преобразователя излучение поглощается и преобразуется в тепловой поток, средняя мощность которого пропорциональна средней мощности излучения. В результате этого, как и при воздействии электрического тока, термобатарея ПИ-1541 реагирует

на тепловое воздействие и обеспечивает появление электрического сигнала $V_о$, пропорционального мощности воздействия, а следовательно, и средней мощности оптического излучения $P_о$. Это позволяет проводить с помощью ЭСМЭЛИ косвенные измерения средней мощности оптического излучения и воспроизводить эту единицу:

$$P_о = V_о / K_э \cdot K_{эз}, \quad (2)$$

где $K_{эз}$ — коэффициент эквивалентности замещения средней мощности оптического излучения известной мощностью постоянного электрического тока.

Важной составляющей эталона также является аппаратура измерений и регистрации электрических сигналов, предназначенная для измерений и регистрации выходных сигналов ЭИП и поверяемого (калибруемого) СИ, напряжения и тока электрической калибровки ЭИП. При выборе аппаратуры измерений и регистрации предпочтение было отдано высокоточным цифровым приборам, их число минимизировано за счет коммутации измеряемых электрических сигналов; обработка выходных электрических сигналов производится автоматически блоком измерений и управления эталоном 50, включающим блок измерений мощности низкоуровневого ЛИ. Использование прецизионного высокочувствительного трап-детектора эталонного класса 42 с контроллером температуры 47 и трансимпедансным усилителем эталонного класса 43 позволило существенно расширить динамический диапазон измерений мощности ЛИ.

Состав эталона

Внешний вид ЭСМЭЛИ представлен на рис. 2. Он состоит из четырех основных частей:

1) аппаратуры измерений средней мощности и энергии ЛИ. В ее состав входят:

- эталонный измерительный преобразователь калориметрического типа ПИ-1541 производства ФГУП “ВНИИОФИ”, снабженный обмоткой замещения для подачи в нее мощности электрического тока и установленный на прецизионную линейную площадку перемещения 39 производства компании OWIS. Управление площадками перемещения осуществляется с помощью универсального блока управления положением площадок PS90–48–06.33 производства компании OWIS;

- блок электрической калибровки 46 на основе источника питания постоянного тока Keysight E36103A производства компании Keysight Technologies Inc., предназначенный для подачи мощности электрического тока в обмотку замещения ЭИП;

- трап-детектор модели LTD-11 эталонного класса 42, установленный на прецизионную линейную площадку перемещения 39 производства компании OWIS с контроллером температуры 47

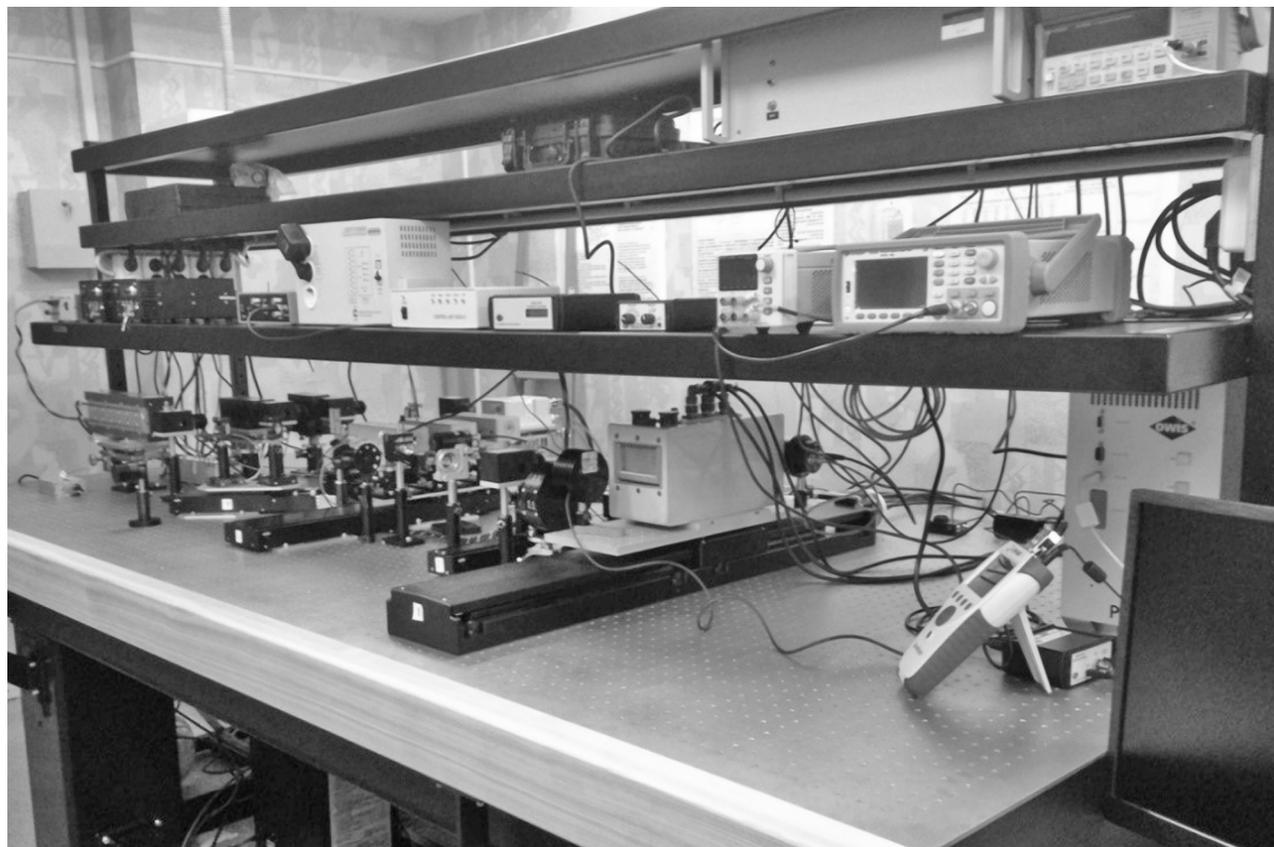


Рис. 2. Внешний вид ЭСМЭЛИ

и блоком питания 48, трансимпедансным усилителем эталонного класса модели 3300 43 с блоком питания 45 производства компании L-1 Standards and Technology Inc.;

- блок измерения временных характеристик импульсов излучения, включающий оптоэлектрический преобразователь импульсного ЛИ FPS-126 с блоком питания 29 производства компании Ophir Optronics Solutions Ltd и частотомер Keysight 53220A 32 производства компании Keysight Technologies Inc.;

- приемник-“свидетель” 25 производства ФГУП “ВНИИОФИ” для контроля стабильности мощности ЛИ;

- цифровой нановольтметр Keysight 34420A 49 производства компании Keysight Technologies Inc. для измерения напряжения и силы тока, подаваемого в обмотку замещения ЭИП, а также регистрации выходных сигналов ЭИП, трап-детектора и приемника-“свидетеля”;

- блок дополнительных переносных эталонных приемников излучения на основе измерителей энергии и мощности ЛИ производства компании Ophir Optronics Solutions Ltd;

2) аппаратуры передачи размера единиц средней мощности и энергии ЛИ поверяемым (калибруемым) эталонам. В ее состав входят:

- блок лазерных излучателей на видимую и ИК области спектра, включающий четыре высокостабильных (долговременная стабильность

мощности излучения менее 1 %) лазера: MLL-F-532–2.5W 2 и MLL-H-808–5W 3 производства компании Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Opus 1064 10 производства компании Laser Quantum, Merit S1 производства компании Access Laser Company с длинами волн излучения 0,532; 0,808; 1,064 и 10,6 мкм, соответственно;

- блок формирования импульсов излучения и измерения их характеристик, включающий оптические затворы 20, 21, 22 на основе ячеек Поккельса и генератор импульсов 44 производства ООО “Лаборатория Фотоники”, блок управления оптическими затворами QBD-ВТ 27 производства ООО OEM Tech;

- оптическая система для транспортировки ЛИ, состоящая из поворотных зеркал 11, 12, 13, 15 и светоделительной пластинки из стекла К830, установленных на прецизионные линейные площадки перемещения 16, 17, 18, 23, 31 производства компании OWIS, светоделительной пластинки из ВаF₂ 28;

- фокусирующая оптика 7 и 8;

- автоматизированный аттенюатор 36 с блоком управления 37 и питания 38 производства компании Standa (вариация коэффициента пропускания от 1 до 3·10⁻⁹);

- блок автоматизированных заслонок, включающий комплект заслонок для перекрытия ЛИ 4, 5, 6, 14, 35 с блоком управления заслонками 34 производства СП “ЛОТИС ТИИ”;

- ловушки ЛИ 9, 19;
- 3) аппаратуры управления, сбора и обработки измерительной информации, в которую входят:
- блок измерения, коммутации и управления эталоном (БИУЭ) 50, обеспечивающий управление процессом воспроизведения и передачи размера единиц средней мощности либо энергии ЛИ, получение, математическую обработку, вывод и хранение результатов измерений;
 - персональный компьютер (ПК) с принтером и специальным программным обеспечением (ПО);
- 4) оптического стола производства компании Standa, состоящего из:
- сотовой столешницы 1НТ15–30–20 размером $3 \times 1,5 \times 0,2$ м³ с защитным подлокотником;
 - пневматической виброизолирующей системы 1VIS22W-11–18–70 с компрессором 1VIS-BB15V;
 - полки для оборудования 1IS300-ААВ.

Алгоритмы работы ЭСМЭЛИ

Вся работа эталона осуществляется под управлением ПК с помощью специально разработанного ПО. Процессы воспроизведения и передачи единицы средней мощности ЛИ, а также воспроизведения и передачи единицы энергии ЛИ реализованы в несколько этапов. Так, при воспроизведении и передаче единицы средней мощности ЛИ с помощью ПИ-15 таких этапов 8.

1-й этап. Измерение нулевых сигналов

Излучение лазеров на ЭИП и приемник-“свидетель” не подается, поскольку заслонки 4, 5, 6, 14 перед лазерами и 35 перед ЭИП закрыты. Также не подается электрический ток в электрический нагреватель ЭИП. На этом этапе реализованы следующие процессы:

- ожидание термодинамического равновесия;
- измерение нулевого напряжения на обмотке замещения ЭИП U_{01} ;
- измерение нулевого тока в обмотке замещения ЭИП I_{01} ;
- измерение нулевого напряжения на термобатарее ЭИП V_{01} ;
- измерение нулевого напряжения на приемнике-“свидетеле”.

2-й этап. Калибровка по электрической мощности

Излучение одного из лазеров 1, 2, 3 или 10 подается на приемник-“свидетель”, а на ЭИП не подается, поскольку в зависимости от выбранного лазера открыта одна из заслонок 4, 5, 6, 14, а заслонка 35 закрыта. На этом этапе реализованы следующие процессы:

- подача ЛИ на приемник-“свидетель”;
- измерение напряжения на приемнике-“свидетеле”;

- оценка мощности ЛИ;
- подача мощности электрического тока в ЭИП;
- ожидание термодинамического равновесия ЭИП;
- измерение напряжения на обмотке замещения ЭИП U_1 ;
- измерение силы тока в обмотке замещения ЭИП I_1 ;
- измерение напряжения на термобатарее ЭИП $V_{Э1}$.

3-й этап. Калибровка по оптической мощности

Излучение одного из лазеров 1, 2, 3 или 10 подается на приемник-“свидетель” и на ЭИП, поскольку в зависимости от выбранного лазера открыта одна из заслонок 4, 5, 6, 14 и заслонка 35. На этом этапе реализованы следующие процессы:

- подача ЛИ на приемник-“свидетель” и ЭИП;
- ожидание термодинамического равновесия;
- измерение напряжения на термобатарее ЭИП V_0 ;
- измерение напряжения на приемнике-“свидетеле”.

4-й этап. Калибровка по электрической мощности

Излучение одного из лазеров 1, 2, 3 или 10 подается на приемник-“свидетель”, а на ЭИП не подается, поскольку в зависимости от выбранного лазера открыта одна из заслонок 4, 5, 6, 14, а заслонка 35 закрыта. На этом этапе реализованы следующие процессы:

- подача ЛИ на приемник-“свидетель”;
- подача мощности электрического тока в ЭИП;
- ожидание термодинамического равновесия;
- измерение напряжения на обмотке замещения ЭИП U_2 ;
- измерение силы тока в обмотке замещения ЭИП I_2 ;
- измерение напряжения на термобатарее ЭИП $V_{Э2}$.

5-й этап. Измерение нулевых сигналов

Излучение лазеров на ЭИП и приемник-“свидетель” не подается, поскольку заслонки 4, 5, 6, 14 перед лазерами и 35 перед ЭИП закрыты. Также не подается электрический ток в электрический нагреватель ЭИП. На этом этапе реализованы следующие процессы:

- ожидание термодинамического равновесия;
- измерение нулевого напряжения на обмотке замещения ЭИП U_{02} ;
- измерение нулевого тока в обмотке замещения ЭИП I_{02} ;
- измерение нулевого напряжения на термобатарее ЭИП V_{02} ;

• измерение нулевого напряжения на приемнике-“свидетеле”.

6-й этап. Вычисление результата измерений

Излучение лазеров на ЭИП и приемник-“свидетель” не подается, поскольку заслонки 4, 5, 6, 14 перед лазерами и 35 перед ЭИП закрыты. Также не подается электрический ток в электрический нагреватель ЭИП. Происходит вычисление и отображение следующих значений, полученных в результате воспроизведения средней мощности ЛИ:

- напряжения при калибровке U ;
- силы тока при калибровке I ;
- мощности электрического тока $P_э$;
- напряжения выходного электрического сигнала $V_э$;
- коэффициента преобразования средней мощности электрического тока $K_э$;
- напряжения выходного электрического сигнала $V_о$;
- мощности ЛИ $P_о$;
- СКО воспроизведения единицы средней мощности ЛИ;
- неисключенной систематической погрешности (НСП) воспроизведения единицы средней мощности ЛИ;
- суммарной стандартной неопределенности воспроизведения единицы средней мощности ЛИ.

7-й этап. Передача единицы средней мощности ЛИ КСИ

Излучение одного из лазеров 1, 2, 3 или 10 подается на приемник-“свидетель” и на КСИ, поскольку в зависимости от выбранного лазера

$$u_c(P) = \sqrt{u^2(I) + u^2(U) + u^2(V_э) + u^2(V_о) + u^2(K_{э3}) + u^2(P_T) + u^2(P_{NL}) + u^2(P_{II})}, \quad (3)$$

где $u(I)$ — относительная неопределенность результата измерений силы тока при электрической калибровке ЭИП;

$u(U)$ — относительная неопределенность результата измерений напряжения при электрической калибровке ЭИП;

$u(V_э)$ — относительная неопределенность результата измерений выходного сигнала ЭИП при его электрической калибровке;

$u(V_о)$ — относительная неопределенность результата измерений выходного сигнала ЭИП при подаче на него ЛИ;

$u(K_{э3})$ — относительная стандартная неопределенность определения коэффициента эквивалентности, оцениваемая по типу В;

$u(P_T)$ — относительная стандартная неопределенность воспроизведения единицы средней мощности ЛИ, обусловленная влиянием температуры окружающей среды и оцениваемая по типу В;

открыта одна из заслонок 4, 5, 6, 14 и заслонка 35. На этом этапе реализованы следующие процессы:

- подача ЛИ на приемник-“свидетель” и на КСИ;
- ожидание термодинамического равновесия;
- измерение напряжения на приемнике-“свидетеле”;
- измерение показаний КСИ.

8-й этап. Вычисление калибровочного коэффициента

Излучение лазеров на ЭИП и приемник-“свидетель” не подается, поскольку заслонки 4, 5, 6, 14 перед лазерами и 35 перед ЭИП закрыты. Также не подается электрический ток в электрический нагреватель ЭИП. Происходит вычисление и отображение следующих значений, полученных в результате передачи единицы средней мощности ЛИ:

- эталонного значения средней мощности ЛИ, подаваемого на КСИ;
- средней мощности ЛИ, измеренной КСИ;
- калибровочного коэффициента;
- СКО передачи единицы средней мощности ЛИ;
- НСП передачи единицы средней мощности ЛИ;
- суммарной стандартной неопределенности передачи единицы средней мощности ЛИ.

Суммарная стандартная неопределенность воспроизведения единицы средней мощности ЛИ

Относительная суммарная стандартная неопределенность воспроизведения единицы средней мощности ЛИ с помощью эталонного первичного калориметрического измерительного преобразователя ПИ-15 рассчитывалась по формуле

$u(P_{NL})$ — относительная стандартная неопределенность воспроизведения единицы средней мощности ЛИ, обусловленная нелинейностью ЭИП;

$u(P_{II})$ — относительная стандартная неопределенность, обусловленная пространственной неоднородностью чувствительности ЭИП и оцениваемая по типу В.

В формуле (3) относительная неопределенность результата измерений силы тока при электрической калибровке ЭИП рассчитывалась по формуле

$$u(I) = \sqrt{u_B(I) + u_A(I) + u_A(I_0)}, \quad (4)$$

где $u_B(I)$ — относительная неопределенность результата измерений силы тока, оцениваемая по типу В;

$u_A(I)$ — относительная неопределенность результата измерений силы тока при электрической калибровке ЭИП, оцениваемая по типу А, как максимальное значение относительных неопределенностей результатов измерения среднего значения силы тока на этапах 2 ($u_A(I_1)$) и 4 ($u_A(I_2)$):

$$u_A(I) = \max[u_A(I_1), u_A(I_2)], \quad (5)$$

$$u_A(I_1) = \frac{1}{\bar{I}_1 - \bar{I}_{01}^{\ominus}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{I}_1 - I_{1,i})^2}{n(n-1)}}, \quad (6)$$

$$u_A(I_2) = \frac{1}{\bar{I}_2 - \bar{I}_{02}^{\ominus}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{I}_2 - I_{2,i})^2}{n(n-1)}}. \quad (7)$$

Здесь \bar{I}_1 и \bar{I}_2 — средние значения силы тока, измеренные при электрической калибровке ЭИП на этапах 2 и 4, соответственно, \bar{I}_{01}^{\ominus} и \bar{I}_{02}^{\ominus} — средние значения нулевого тока в обмотке замещения, измеренные в моменты измерения силы тока I_1 и I_2 , соответственно, n — количество измерений; $u_A(I_0)$ — относительная неопределенность результата измерений нулевого тока, оцениваемая по типу А, как максимальное значение относительных неопределенностей результатов измерения среднего нулевого тока на этапах 1 ($u_A(I_{01})$) и 5 ($u_A(I_{02})$):

$$u_A(I_0) = \max[u_A(I_{01}), u_A(I_{02})], \quad (8)$$

$$u_A(I_{01}) = \frac{1}{\bar{I}_1 - \bar{I}_{01}^{\ominus}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{I}_{01} - I_{01,i})^2}{n(n-1)}}, \quad (9)$$

$$u_A(I_{02}) = \frac{1}{\bar{I}_2 - \bar{I}_{02}^{\ominus}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{I}_{02} - I_{02,i})^2}{n(n-1)}}. \quad (10)$$

Относительные неопределенности $u(U)$, $u(V_{\ominus})$, $u(V_0)$ рассчитывались по формулам, аналогичным (4) — (10).

Исследование метрологических характеристик эталона

Создаваемый эталон должен обеспечивать воспроизведение и хранение в спектральном диапазоне от 0,2 до 10,6 мкм единицы средней мощности ЛИ в динамическом диапазоне от 10^{-9} до 2 Вт с относительной стандартной неопределенностью, не превышающей 0,07 %, и единицы энергии ЛИ в диапазоне от 10^{-9} до 1 Дж с неопределенностью не более 0,5 %, а также передачу единицы средней мощности ЛИ на длинах волн 0,532; 0,808; 1,064

и 10,6 мкм и единицы энергии ЛИ на длинах волн 0,532; 0,808; 1,064 мкм.

В процессе исследования метрологических характеристик эталона проводилась оценка точности воспроизводимых значений средней мощности ЛИ, коэффициента преобразования средней мощности электрического тока, коэффициента эквивалентности замещения, а также влияние на точность воспроизведения единицы средней мощности ЛИ таких факторов, как уровень мощности, параметры окружающей среды, стабильность источников излучения, погрешности применяемых средств измерений.

Полученное в результате проведенных исследований среднее значение коэффициента преобразования средней мощности электрического тока K_{\ominus} находится в пределах $5,10 \pm 0,01$ мВ/Вт. Относительная суммарная стандартная неопределенность воспроизведения единицы средней мощности ЛИ с помощью эталонного первичного калориметрического измерительного преобразователя ПИ-15 не превышает 0,024 %.

Заключение

Национальный эталон единицы средней мощности и энергии лазерного излучения Республики Беларусь соответствует требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ 8.275–2016 [2], введенного в действие в Республике Беларусь.

Использование “последовательной” схемы построения эталона для воспроизведения и передачи единиц средней мощности ЛИ и энергии импульсного ЛИ в совокупности с использованием новой элементной базы и программного обеспечения позволяет улучшить точностные характеристики эталона, существенно расширить его рабочий диапазон, а также полностью автоматизировать процесс проведения измерений.

Национальный эталон единиц средней мощности и энергии ЛИ будет обеспечивать потребности Республики Беларусь в поверке (калибровке) эталонов низшего звена, поверочных (калибровочных) установок и рабочих СИ энергетических характеристик ЛИ, позволит принимать участие в международных сличениях и сможет служить основой для создания последующих уровней поверочной схемы. Работа направлена на метрологическое обеспечение лазерной техники, создаваемой и используемой в ведомствах и организациях Республики Беларусь.

Створення національного еталона одиниць середньої потужності та енергії лазерного випромінювання Республіки Білорусь

В.А. Длугунович, Д.О. Дунець, А.В. Ісаєвич, О.О. Круплевич,
Л.М. Насенник

Державна наукова установа "Інститут фізики імені Б.І. Степанова НАН Білорусі", пр. Незалежності, 68–2, 220072,
Мінськ, Республіка Білорусь
e.kruplevich@dragon.bas-net.by

Анотація

Статтю присвячено створенню національного еталона одиниць середньої потужності та енергії лазерного випромінювання Республіки Білорусь.

Донедавна зберігання, відтворення і передавання одиниці середньої потужності лазерного випромінювання робочим засобам вимірювань потужності випромінювання забезпечував вихідний еталон одиниці середньої потужності лазерного випромінювання Республіки Білорусь ІЭ РБ 10–06, метрологічні можливості якого не задовольняють зростаючі потреби виробників і споживачів сучасної лазерної техніки.

Розглянуто оптичну схему, склад і алгоритми роботи еталона, що створюється, а також невизначеності відтворення одиниці середньої потужності лазерного випромінювання за допомогою еталонного вимірювального перетворювача ПИ-15, що входить до складу еталона.

Еталон, що створюється, повинен забезпечувати відтворення і зберігання в спектральному діапазоні від 0,2 до 10,6 мкм одиниці середньої потужності лазерного випромінювання в динамічному діапазоні від 10^{-9} до 2 Вт із відносною стандартною невизначеністю, що не перевищує 0,07 %, і одиниці енергії лазерного випромінювання в діапазоні від 10^{-9} до 1 Дж із невизначеністю не більше 0,5 %, а також передавання одиниці середньої потужності на довжинах хвиль 0,532; 0,808; 1,064 і 10,6 мкм та одиниці енергії на довжинах хвиль 0,532; 0,808; 1,064 мкм.

Подано результати дослідження метрологічних характеристик еталона при відтворенні одиниці середньої потужності лазерного випромінювання, під час проведення яких виконувалася оцінка точності відтворюваних значень середньої потужності лазерного випромінювання, коефіцієнта перетворення середньої потужності електричного струму, коефіцієнта еквівалентності заміщення, а також вплив на точність відтворення одиниці середньої потужності лазерного випромінювання таких чинників, як рівні потужності, параметри навколишнього середовища, стабільність джерел випромінювання, похибки застосовуваних засобів вимірювань.

Отримане в результаті проведених досліджень середнє значення коефіцієнта перетворення середньої потужності електричного струму K_3 знаходиться в межах $5,10 \pm 0,01$ мВ/Вт. Відносна сумарна стандартна невизначеність відтворення одиниці середньої потужності лазерного випромінювання під час відтворення одиниці середньої потужності за допомогою перетворювача ПИ-15 не перевищує 0,024 %.

Ключові слова: національний еталон, середня потужність, енергія, лазерне випромінювання, калібрування.

Creation of the national measurement standard of the units of average power and energy of laser radiation of the Republic of Belarus

V.A. Dlugunovich, D.O. Dunets, A.V. Isaevich, E.A. Kruplevich,
L.N. Nasennik

Institute of Physics of the NAS of Belarus, Nezavisimosti Ave., 68–2, 220072, Minsk, Republic of Belarus
e.kruplevich@dragon.bas-net.by

Abstract

The article is concerned with the creation of the national measurement standard of units of CW laser radiation power and energy of pulsed laser radiation of the Republic of Belarus.

Until recently, the maintenance, reproduction and transfer of the unit of average CW laser radiation power to working measurement instruments have been provided by the reference measurement standard of the average CW laser radiation power unit of the Republic of Belarus IE RB10–06, whose metrological capabilities do not meet the growing needs of manufacturers and consumers of modern laser technology.

The article discusses the optical scheme, composition and operation algorithm of the measurement standard being created, as well as the uncertainty of reproduction of CW laser radiation power unit using the reference measuring transducer PI-15, which is a part of the measurement standard.

The measurement standard being created should provide reproduction and maintenance in the spectral range from 0.2 μm to 10.6 μm of the average CW laser radiation power unit in the dynamic range from 10^{-9} W to 2 W with relative standard uncertainty less than 0.07 %, and pulse laser radiation energy unit in the range from 10^{-9} J to 1 J with relative standard uncertainty less than 0.5 %, as well as the transfer of the unit of average CW laser radiation power at wavelengths of 0.532; 0.808; 1.064 and 10.6 μm and the energy unit of pulse laser radiation at wavelengths of 0.532; 0.808; 1.064 μm .

The results of the study of metrological characteristics of the measurement standard during reproduction of the average CW laser radiation power unit are described, during which the accuracy of the reproducible average laser power, the conversion ratio of the electric current average power, the coefficient of substitution equivalence, as well as the effect on the accuracy of reproduction of the average laser power unit such factors as power level, environmental parameters, stability radiation sources, accuracy of the used measuring instruments have been evaluated.

The obtained average value of the conversion ratio of the electric current average power is in the range of 5.10 ± 0.01 mV/W. The relative total standard uncertainty of reproduction of the average CW laser radiation power unit using the reference measuring transducer PI-15 does not exceed 0.024 %.

Keywords: national measurement standard, average power, energy, laser radiation, calibration.

Список литературы

1. Либерман А. А. Результаты сличений эталонов единицы средней мощности лазерного излучения на длинах волн 0,532, 1,064 и 10,6 мкм России и Германии. *Измерительная техника*. 2013. № 8. С. 68–72.
2. ГОСТ 8.275–2016. 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 [Введен 01.09.2018]. Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2018. 12 с.

References

1. Liberman A. A. Rezultaty slicheniy etalonov yedinit sredney moshchnosti lazernogo izlucheniya

na dlinakh voln 0,532, 1,064 i 10,6 mkm Rossii i Germanii [Results of comparisons of the measurement standards of the units of average laser power at the wavelengths of 0.532, 1.064 and 10.6 μm in Russia and Germany]. *Izmeritel'naya tekhnika — Measurement Techniques*, 2013, no.8, pp. 68–72 (in Russian).

2. GOST 8.275–2016. Gosudarstvennaya po-verochnaya schema dlya sredstv izmereniy sredney moshchnosti lazernogo izlucheniya i energii impul'snogo lazernogo izlucheniya v diapazone dlin voln ot 0,3 do 12,0 mkm [State verification schedule for means of measuring laser output average power and laser pulse energy within the wavelength range from 0.3 to 12.0 μm : Effective from 01.09.2018]. Minsk, Belarusian State Institute for Standardization and Certification, 2018. 12 p. (in Russian).