

## **Государственный первичный эталон единицы средней мощности лазерного излучения ГЭТ 28-2016**

**Татьяна Владиславовна Гроппа<sup>1</sup>, Вячеслав Семёнович Иванов<sup>2</sup>, Анатолий Абрамович Либерман<sup>3</sup>, Алексей Сергеевич Микрюков<sup>4</sup>, Сергей Александрович Москалюк<sup>5</sup>✉**

1, 2, 3, 4, 5 Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

<sup>1</sup>groppa@vniiofi.ru, <sup>2</sup>vsivanov@vniiofi.ru, <sup>3</sup>liber-f2@vniiofi.ru, <sup>4</sup>anzio64@gmail.com, <sup>5</sup>mrsergik@mail.ru✉

**Аннотация.** Приведено описание Государственного первичного эталона единицы средней мощности лазерного излучения ГЭТ 28-2016 с диапазоном мощности  $10^{-9}$ – $5 \cdot 10^{-3}$  Вт. Описан принцип работы эталона на основе фотоэлектрического трап-детектора в диапазоне  $10^{-9}$ – $5 \cdot 10^{-3}$  Вт. В результате метрологических исследований на ГЭТ 28-2016 в рассматриваемом диапазоне получена суммарная стандартная неопределённость воспроизведения и передачи единицы средней мощности лазерного излучения не более 0,36 %. Приведена модель и теоретические характеристики измерительного светоделиителя, который позволит расширить диапазон ГЭТ 28-2016 в область киловаттных уровней мощности. В настоящее время ГЭТ 28-2016 позволяет решать задачи метрологического обеспечения перспективных низкоуровневых лазерных систем локации как в наземной, так и в авиационно-космической области, обеспечивать единство измерений радиометрических параметров низкоинтенсивных потоков лазерного излучения.

**Ключевые слова:** эталон, лазерное излучение, мощность лазерного излучения, низкие уровни лазерного излучения, высокие уровни лазерного излучения, трап-детектор, стандартная неопределённость

**Для цитирования:** Гроппа Т. В., Иванов В. С., Либерман А. А., Микрюков А. С., Москалюк С. А. Государственный первичный эталон единицы средней мощности лазерного излучения ГЭТ 28-2016 // Измерительная техника. 2021. № 1. С. 3–8. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-1-3-8>

## **National primary standard for the unit of average laser radiation power GET 28-2016**

**Tatiana V. Groppa<sup>1</sup>, Vyacheslav S. Ivanov<sup>2</sup>, Anatoly A. Liberman<sup>3</sup>, Aleksey S. Mikryukov<sup>4</sup>, Sergey A. Moskalyuk<sup>5</sup>✉**

1, 2, 3, 4, 5 All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russia

<sup>1</sup>groppa@vniiofi.ru, <sup>2</sup>vsivanov@vniiofi.ru, <sup>3</sup>liber-f2@vniiofi.ru, <sup>4</sup>anzio64@gmail.com, <sup>5</sup>mrsergik@mail.ru✉

**Abstract.** The description of the National primary standard for the unit of average laser radiation power GET 28-2016 with a power range from  $10^{-9}$  to  $5 \cdot 10^{-3}$  W is described. The principle of operation of a standard based on a photoelectric trap detector in the range from  $10^{-9}$  to  $5 \cdot 10^{-3}$  W is described. As a result of metrological studies at National primary standard, it was determined that the value of the total standard uncertainty of reproduction and transmission of an average power unit for the range from  $10^{-9}$  to  $5 \cdot 10^{-3}$  W is no more than 0.36 %. The model and theoretical characteristics of the measuring beam splitter, allowing to expand the range of the National primary standard to the range of kilowatt power levels, are presented.

National primary standard allows solving the problems of metrological support of promising low-level laser ranging systems both in the ground and in the aerospace field, ensuring the uniformity of measurements of radiometric parameters of low-intensity laser radiation fluxes.

**Keywords:** standard, laser radiation, laser power, low laser power, high laser power, trap-detector, standard uncertainty

**Введение.** В настоящее время в России единство измерений средней мощности и энергии лазерного излучения регламентировано разработанной во ВНИИОФИ государственной поверочной схемой для средств измерений (СИ) средней мощности лазерного излучения и энергии импульсного лазерного излучения в диапазоне длин волн 0,3–12,0 мкм.

Многоступенчатая поверочная схема гарантирует поверку большинства СИ средней мощности и энергии лазерного излучения, находящихся в обращении в любом регионе страны, а также регламентирует процесс поверки СИ, работающих в среднем и низкоуровневом диапазонах мощностей лазерного излучения соответственно  $10^{-3}$ – $10^3$  Вт и  $10^{-15}$ – $10^{-3}$  Вт.

Возглавляет поверочную схему ГЭТ 28-2016, который воспроизводит, хранит и передает единицу мощности лазерного излучения вторичным эталонам. ГЭТ 28-2016

имеет широкий диапазон мощности лазерного излучения  $10^{-9}$ –2,0 Вт и позволяет воспроизводить и передавать единицу средней мощности в двух поддиапазонах  $5 \cdot 10^{-3}$ –2 Вт [1] и  $10^{-9}$ – $5 \cdot 10^{-3}$  Вт.

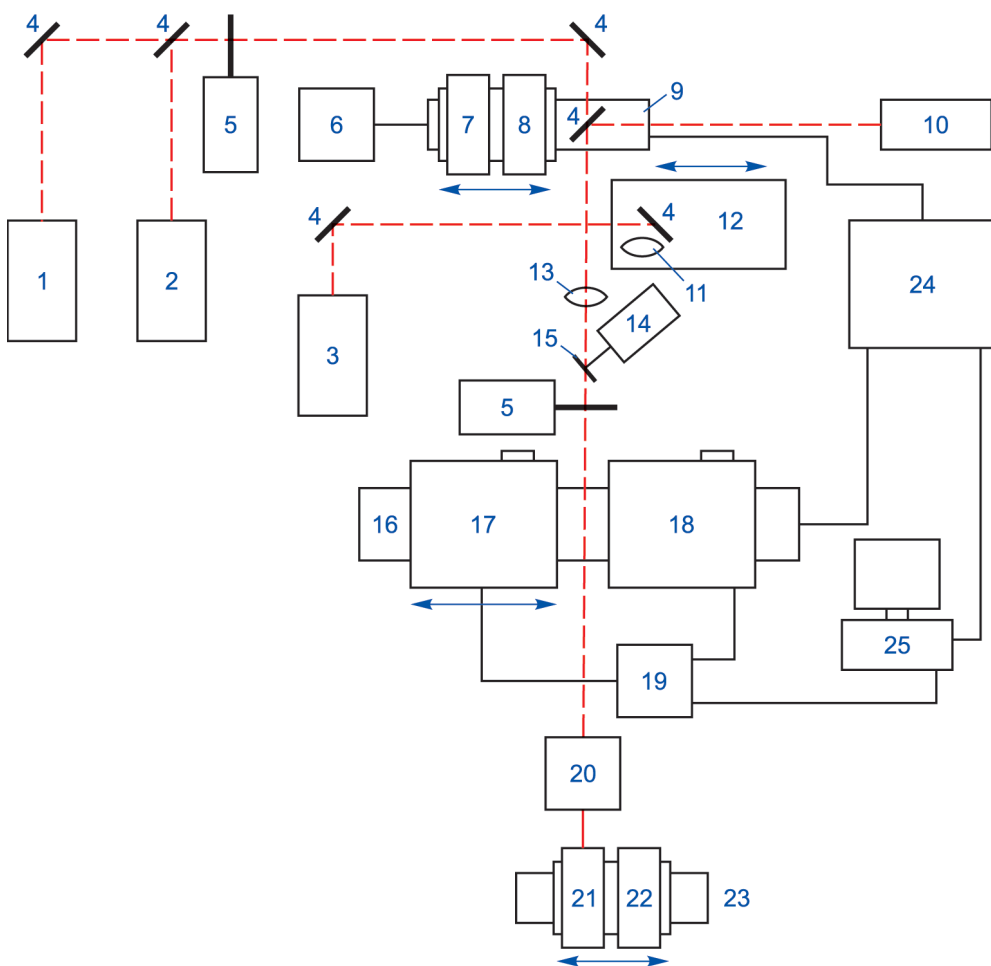


Рис. 1. Структурная схема ГЭТ 28-2016:

1 – лазер Verdi V8 (длина волны 0,532 мкм); 2 – лазер Compass 1064 – 4000 (1,064 мкм); 3 – лазер GEM SELECT 50 (10,6 мкм); 4 – поворотное зеркало; 5 – затвор-шторка; 6 – блоки питания полупроводниковых лазеров; 7, 8 – полупроводниковые лазеры соответственно EMS-1060-50 (1,053 мкм), EMHO-910-3CS (0,912 мкм); 9 – высокоточная подвижка LTM60-150; 10 – газовый лазер Thorlabs HRS015 Stabilized He-Ne (0,632 мкм); 11, 13 – фокусирующие линзы соответственно из AsGa и BaF<sub>2</sub>; 12 – подвижка для ввода в оптическую схему длины волны 10,6 мкм; 14 – приёмник-свидетель; 15 – плоскопараллельная пластина; 16 – высокоточная подвижка LINES 170-600; 17 – эталонный первичный измерительный преобразователь; 18 – поверяемое СИ в диапазоне от  $5 \cdot 10^{-3}$  до 2 Вт; 19 – блок управления и коммутации; 20 – ослабитель из нейтральных светофильтров; 21 – фотоэлектрический трап-детектор с трансимпедансным усилителем; 22 – поверяемое СИ в диапазоне от  $10^{-9}$  до  $5 \cdot 10^{-3}$  Вт; 23 – высокоточная подвижка Standa 8MT175-200; 24 – контроллер PS90; 25 – персональный компьютер

Fig. 1. Block diagram of GET 28-2016:

1 – laser Verdi V8 (wavelength 0,532  $\mu\text{m}$ ); 2 – laser Compass 1064 – 4000 (wavelength 1,064  $\mu\text{m}$ ); 3 – laser GEM SELECT 50 (wavelength 10,6  $\mu\text{m}$ ); 4 – swivel mirror; 5 – shutter; 6 – laser power supplies; 7 – laser EMS-1060-50 (wavelength 1,053  $\mu\text{m}$ ); 8 – laser EMHO-910-3CS (wavelength 0,912  $\mu\text{m}$ ); 9 – high-precision movement LTM60-150; 10 – laser Thorlabs HRS015 Stabilized He-Ne (wavelength 0,632  $\mu\text{m}$ ); 11 – focusing lens AsGa; 12 – high-precision movement for 10,6  $\mu\text{m}$ ; 13 – focusing lens BaF<sub>2</sub>; 14 – monitor-detector; 15 – plane-parallel plate; 16 – high-precision movement LINES 170-600; 17 – standard; 18 – verified detector; 19 – control unit; 20 – ND attenuator; 21 – trap-detector; 22 – verified detector; 23 – high-precision movement Standa 8MT175-200; 24 controller PS90; 25 – computer

ГЭТ 28-2016 работает практически полностью в автоматическом режиме и имеет широкие функциональные возможности, в частности автоматическую перестройку оптического тракта для работы с шестью длинами волн: 0,532; 0,632; 0,912; 1,053; 1,064; 10,6 мкм. Перестройка длин волн происходит с помощью прецизионных автоматических подвижек.

#### Принцип действия ГЭТ 28-2016 в диапазоне мощности $10^{-9}$ – $5 \cdot 10^{-3}$ Вт.

В качестве эталонного измерительного преобразователя в диапазоне мощности  $10^{-9}$ – $5 \cdot 10^{-3}$  Вт в ГЭТ 28-2016 вместо привычных прецизионных, но инерционных тепловых приёмников, используется быстродействующий фотоэлектрический трап-детектор модели HH03-S1337.

На рис. 1 изображена структурная схема ГЭТ 28-2016 с использованием последовательного способа передачи единицы средней мощности лазерного излучения [2]. Пунктиром обозначены основные направления распространения излучения.

Измерения средней мощности лазерного излучения в диапазоне  $10^{-9}$ – $5 \cdot 10^{-3}$  Вт осуществляется на длинах волн 0,532; 0,632 мкм (см. рис. 1, лазеры 1, 10). По алгоритму управляющей программы задаётся требуемая длина волны. При этом подвижка 9 обеспечивает беспрепятственное прохождение излучения в направлении измерительных преобразователей. На следующем шаге выбирается диапазон измеряемой мощности. При этом подвижка 12 автоматически устанавливается в положение, при котором излучение напрямую распространяется в направлении ослабителя 20. Одновременно в ослабителе мощности автоматически подбирается соответствующий коэффициент ослабления излучения в результате смены светофильтров. Затем устанавливается либо

эталонный измерительный преобразователь (трап-детектор), либо поверяемое СИ 21, 22, открывается затвор-шторка 5 и измеряется средняя мощность лазерного излучения. Сигналы с измерительного преобразователя поступают на вход мультиметра Keithley 2002, далее по GPIB-интерфейсу – на вход персонального компьютера для дальнейшей обработки. После измерения мощности лазерного излучения с помощью трап-детектора на его место помещается измерительный преобразователь, которому передаётся единица мощности. Лазерный пучок фокусируется в центр приёмного элемента.

Измерения сигналов при подаче лазерного излучения как с трап-детектора с трансимпедансным усилителем, так и с поверяемого СИ, производятся в автоматическом режиме с помощью персонального компьютера и управляющей программы.

В процессе воспроизведения единицы средней мощности лазерного излучения по сигналам трап-детектора измеряется мощность лазерного излучения  $P_{э. опт}$  из соотношения

$$P_{э. опт} = J/s, \quad (1)$$

где  $J$  – фототок;  $s$  – абсолютная спектральная чувствительность трап-детектора.

Оптическая мощность  $P_{СИ опт}$  на входе поверяемого СИ рассчитывается из соотношения

$$P_{СИ опт} = P_{э. опт} s_{ПС-СИ}/s_{ПС-э}, \quad (2)$$

где  $s_{ПС-СИ}$  – показания приёмника-свидетеля 8 (см. рис. 1) в момент передачи единицы средней мощности поверяемому СИ;  $s_{ПС-э}$  – показания приёмника-свидетеля в момент воспроизведения единицы средней мощности на эталонном трап-детекторе.

Значения входящих в соотношения (1), (2) величин определяются в результате обработки большого количества информативных данных с использованием в схеме эталонной установки контрольного канала 14 (см. рис. 1) для относительных измерений нестабильности мощности излучения лазера.

Функциональная схема используемого трёхэлементного фотоэлектрического трап-детектора представлена на рис. 2. Три фотодиода, входящие в состав трап-детектора, расположены таким образом, что на фотодиоды ФД1, ФД2 лазерное излучение падает под углом 45°, а на фотодиод ФД3 – нормально его поверхности. Прежде чем покинуть устройство излучение отражается от пяти поверхностей. С целью устранения влияния поляризации излучения плоскости отражения на фотодиодах ФД1, ФД2 повернуты относительно друг друга на 90° и ТМ-мода (магнитная) детектора ФД1 является ТЕ-модой (электрическая) для ФД2. В результате почти всё падающее излучение поглощается фотодиодами.

**Метрологические характеристики ГЭТ 28-2016 в диапазоне  $10^{-9}$ – $5 \cdot 10^{-3}$  Вт.** В ходе исследований метрологических характеристик ГЭТ 28-2016 была проведена калибровка трап-детектора на длинах волн 0,532; 0,632 мкм по абсолютной спектральной чувствительности  $s$  к потоку излучения с помощью Государственного первичного эталона единиц величин абсолютной и относительной спектральной чувствительности в диапазоне длин волн от 0,25 до 14,00 мкм ГЭТ 213-2014. В результате калибровки получены следующие значения спектральной чувствительности: 0,4269 А/Вт с суммарной стандартной неопределённостью 0,018 % на длине волны 0,532 мкм при уровне мощности 311 мкВт; 0,5082 А/Вт с суммарной стандартной неопределённостью 0,02 % на длине волны 0,632 мкм при уровне мощности 118 мкВт.

При исследовании метрологических характеристик фотоэлектрического трап-детектора измерены его линейность и зонная характеристика. Линейность измеряли методом ослабления света в диапазоне  $10^{-9}$ – $5 \cdot 10^{-3}$  мВт. Установлено, что квантовая эффективность трап-детектора во всём исследованном диапазоне практически неизменна и близка к единице, линейность составила 0,35 %.

Значения неопределённостей рассчитаны в соответствии с ГОСТ Р 54500.1-2011 «Неопределённость измерения. Часть 1. Введение в руководства по неопределённости

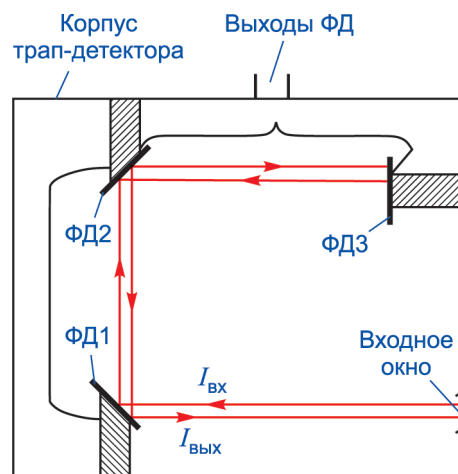


Рис. 2. Функциональная схема трап-детектора:  
 $I_{вх}$ ,  $I_{вых}$  – интенсивности входящего и выходящего оптического излучения; ФД1, ФД2, ФД3 – фотодиоды

Fig. 2. Functional diagram of the trap detector:  
 $I_{in}$ ,  $I_{out}$  – intensity of incoming and outgoing optical radiation; ФД1, ФД2, ФД3 – photodiodes

**Сравнение точности эталонов единицы средней мощности лазерного излучения в различных диапазонах в метрологических институтах России и Германии**

| Метрологическая характеристика       | ВНИИОФИ                          |                                  | РТВ                      |                          |
|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                                      | $5 \cdot 10^{-3}$ –2 Вт          | $10^{-9}$ – $5 \cdot 10^{-3}$ Вт | $5 \cdot 10^{-3}$ –10 Вт | $10^{-5}$ – $10^{-2}$ Вт |
| Длина волны лазерного излучения, мкм | 0,532; 0,912; 1,053; 1,064; 10,6 | 0,532; 0,632                     | 0,337–1,064; 10,6        | 0,6328                   |
| $u_c$ , %                            | 0,1                              | 0,36                             | 0,1                      | 0,02                     |

измерения» и ГОСТ Р 54500.3-2011 «Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения». В результате исследований в диапазоне  $10^{-9}$ – $5 \cdot 10^{-3}$  Вт на ГЭТ 28-2016 получена суммарная стандартная неопределённость измерений  $u_c$  средней мощности 0,36 %.

#### Сопоставление ГЭТ 28-2016 с зарубежными аналогами.

В таблице приведены сравнительные характеристики по точности ГЭТ 28-2016 (ВНИИОФИ, Россия) и национальных эталонов единицы средней мощности лазерного излучения РТВ (Германия) [3].

**Пути совершенствования ГЭТ 28-2016.** В рамках дальнейшей модернизации ГЭТ 28-2016, запланированной на период с 2018–2021 гг., в целях расширения диапазона воспроизведения и передачи единицы мощности лазерного до 10 кВт будет реализован метод измерений средней мощности лазерного излучения с использованием калиброванных ослабителей мощности лазерного излучения, лазера на длине волны 1,07 мкм с выходной мощностью до 10 кВт и эталонного измерительного преобразователя, работающего в диапазоне 0,05–2 Вт. Рассмотрим модель и теоретические характеристики измерительного светоделиителя, с помощью которого в оптическом тракте ГЭТ 28-2016 образуются два измерительных канала: первый канал позволяет ослабить мощность лазерного излучения с коэффициентом ослабления примерно  $10^3$ ; второй канал используется для установки поверяемого средства измерений (в этот канал лазерное излучение поступает практически без ослабления). Использование рассматриваемого измерительного светоделиителя позволяет установить прослеживаемость к средним уровням лазерного излучения ГЭТ 28-2016.

Измерительный светоделиитель рассчитан на работу с оптоволоконным лазером на длине волны 1,07 мкм с выходной мощностью в диапазоне от единиц до десятков киловатт (Иттербиевые непрерывные лазерные системы: [сайт]. URL: <https://www.ipgphotonics.com/ru/products/lasers/nepreryvnye-lazery-vysokoy-moshchnosti/1-mikron/yls-1120-kvt>). Для изготовления силовой оптики, к которой относится рассматриваемый измерительный светоделиитель, широко применяют различные марки высокочистого кварцевого стекла с предельно низким содержанием гидроксильных групп, бесцветного, высшей категории по содержанию пузырей и включений, с высокой радиационно-оптической стойкостью и высоким пропусканием в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. В работах [4], [5] представлены положительные результаты экспериментальных исследований воздействия мощного лазерного излучения на оптические элементы, изготовленные из высокочистого кварцевого стекла и искусственного кристаллического кварца.

Расчёт теоретических характеристик светоделиителя сделан в программе Zemax для кварцевого стекла марки Suprasil (Fused Silica for Applications in the Near Infrared (NIR): [электронный документ]. URL: [https://www.heraeus.com/media/media/hca/doc\\_hca/products\\_and\\_solutions\\_8/optics/Fused\\_Silica\\_for\\_Applications\\_in\\_the\\_NIR\\_EN.pdf](https://www.heraeus.com/media/media/hca/doc_hca/products_and_solutions_8/optics/Fused_Silica_for_Applications_in_the_NIR_EN.pdf)).

Измерительный светоделиитель состоит из трёх узлов: отражающего модулятора, ослабляющего клина и поворотного зеркала. Внешний вид светоделиителя и ход лучей в нём представлены на рис. 3.

Отражающий модулятор предназначен для формирования двух измерительных каналов:

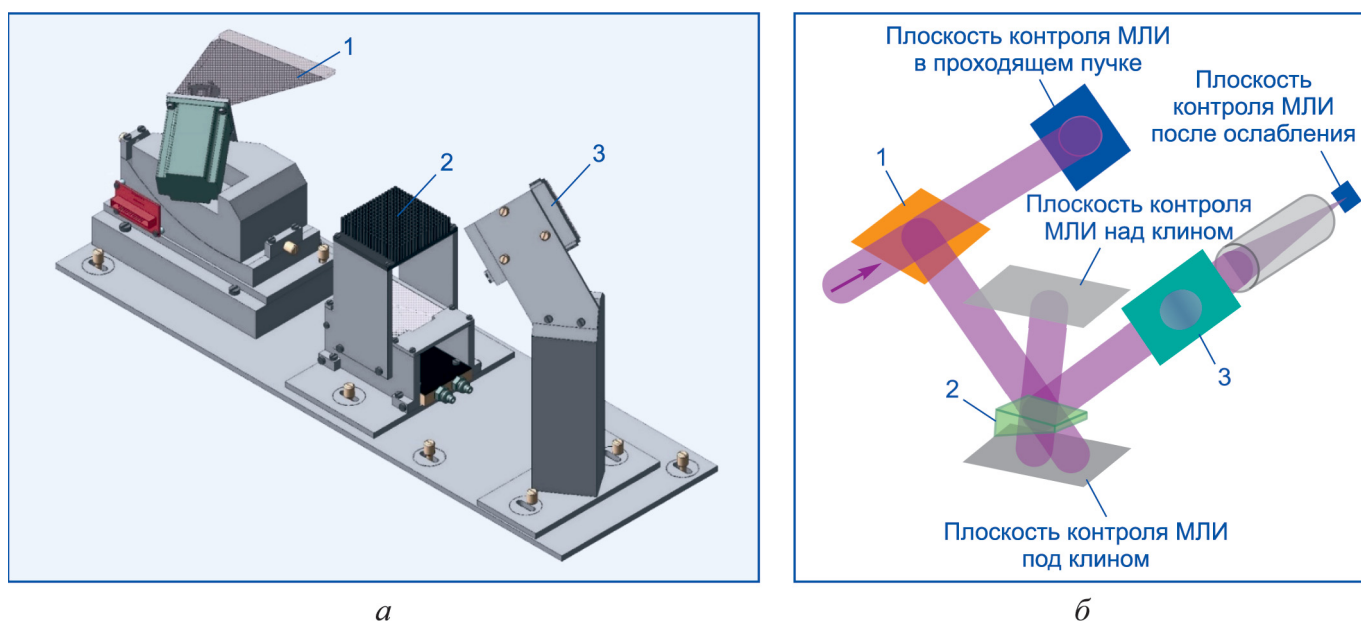


Рис. 3. Общий вид измерительного светоделиителя (а) и ход лучей в нём (б):

1 – отражающий модулятор; 2 – ослабляющий клин; 3 – поворотное зеркало; МЛИ – мощность лазерного излучения

Fig. 3. General view of the measuring beam splitter (a) and beam path of the rays in it (b):

1 – reflective modulator; 2 – weakening wedge; 3 – mirror swivel

проходящее сквозь кварцевое окно модулятора лазерное излучение практически без ослабления попадает в плоскость контроля мощности лазерного излучения в проходящем пучке, где устанавливается СИ лазерного излучения;

отражённое от лопасти модулятора ослабленное лазерное излучение попадает на ослабляющий клин.

Основным элементом отражающего модулятора является лопасть, которая изготовлена в виде сектора из кварцевого стекла. В данной конструкции две отражающие плоскости отражающего модулятора и ослабляющего клина расположены так, чтобы результирующий коэффициент ослабления не зависел от типа поляризации падающего излучения. Поляризационная независимость коэффициента ослабления служит основой для создания калиброванного ослабителя мощности лазерного излучения больших уровней [6]. При отражении от рабочей грани отражающего модулятора и далее от ослабляющего

клина плоскость падения поворачивается на  $90^\circ$  (см. рис. 3).

Ослабляющий клин изготовлен из кварцевого стекла в виде призмы с углом при вершине  $15^\circ$  и имеет габаритные размеры  $68 \times 80$  мм, что гарантирует возможность работы с пучком излучения до 50 мм. Клин в паре с отражающим модулятором создаёт конфигурацию поляризационно нечувствительного ослабителя с коэффициентом ослабления порядка  $10^3$ .

При подаче излучения отражающий модулятор и ослабляющий клин находятся в достаточно жёстких тепловых условиях, на клине рассеивается оптическая мощность порядка 80 Вт. Рассеянное вверх излучение поглощается чёрненным радиатором, расположенным в плоскости контроля мощности лазерного излучения над клином, а прошедшее сквозь клин излучение поглощается охлаждаемым теплообменником в плоскости контроля мощности лазерного излучения под клином.

Для анализа уровня мощности лазерного излучения, проходящего и отражённого от всех элементов измерительного светоделиителя, были заданы следующие начальные параметры системы: мощность излучения 1000 Вт,

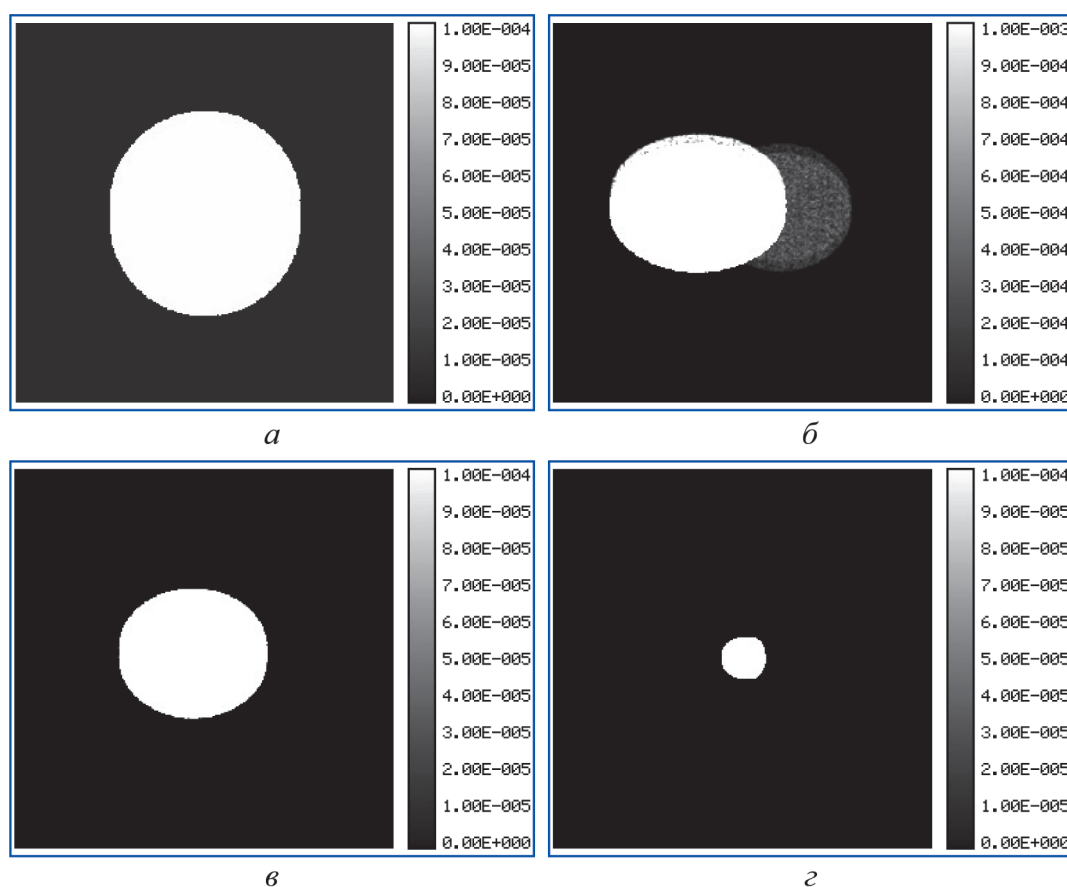


Рис. 4. Мощность лазерного излучения, регистрируемая смоделированными детекторами: а – в плоскости контроля мощности в проходящем пучке (919,21 Вт); б, в – в плоскостях контроля мощности соответственно под клином (77,55 Вт) и над клином (2,1878 Вт); г – в плоскости контроля мощности после ослабления, находящейся после фокусирующей линзы на выходе из измерительного светоделиителя (0,8532 Вт)

Fig. 4. Measuring laser radiation by detectors: а – in the plane of power control in the transmitted beam – 919,21 W; б, в – at the power control planes, under the wedge (77,55 W); above the wedge (2,1878 W); г – at the power control plane after attenuation, located after the focusing lens at the exit from the measuring beam splitter (0,8532 W)

произвольная поляризация и длина волны излучения 1,07 мкм. В системе также учитываются все переотражённые лучи, минимальный уровень мощности которых 50 мВт. На рис. 4 показан результат анализа данных по уровню мощности лазерного излучения в каждой из контрольных плоскостей, отмеченных на рис. 3.

В проходящем пучке мощность лазерного излучения составила 919,47 Вт (91,95 % подаваемой мощности). Под клином рассеивается и поглощается охлаждаемым теплообменником 77,30 Вт (7,73 % мощности). Над клином рассеивается и поглощается чёрненным радиатором 2,18 Вт (0,22 %). В приёмный элемент, расположенный в плоскости контроля мощности лазерного излучения после ослабления, попадает 0,85 Вт (0,09 %).

При моделировании различных типов поляризации исходного излучения (линейная, круговая, эллиптическая, произвольная) эталонный измерительный преобразователь в плоскости контроля мощности лазерного излучения после ослабления регистрировал мощность лазерного излучения

в диапазоне 0,8408–0,8675 Вт. Среднее значение мощности при произвольной поляризации составило 0,8532 Вт.

Отношение уровней мощностей в двух измерительных каналах составляет 1082 ( $\sim 10^3$ ). Таким образом, светоделитель позволяет получить на выходе первого канала поляризационно-независимое излучение с коэффициентом ослабления  $10^3$ . В итоге рассмотренный измерительный светоделитель в совокупности с лазером, работающим на длине волны 1,07 мкм с выходной мощностью до 10 кВт, позволит расширить диапазон ГЭТ 28-2016 в область киловаттных уровней мощности.

**Заключение.** ГЭТ 28-2016 обеспечивает воспроизведение и передачу единицы средней мощности лазерного излучения в диапазоне средней мощности  $10^{-9}$ –2 Вт с помощью вторичных и рабочих эталонов в диапазоне длин волн 0,3–12 мкм рабочим СИ, применяемым в народном хозяйстве России с целью обеспечения единства измерений в стране. По точностным характеристикам ГЭТ 28-2016 находится на уровне национальных эталонов единицы средней мощности лазерного излучения ведущих метрологических институтов.

Единица средней мощности лазерного излучения воспроизводится с суммарной стандартной неопределённостью 0,1 % в диапазоне  $5 \cdot 10^{-3}$ –2 Вт и 0,36 % в диапазоне  $10^{-9}$ – $5 \cdot 10^{-3}$  Вт.

В ходе дальнейшей модернизации ГЭТ 28-2016 и расширения диапазона мощности лазерного излучения в область киловаттных значений в состав эталона планируется введение калиброванного измерительного светоделителя в совокупности с волоконным лазером на длине волны 1,07 мкм с выходной мощностью до 10 кВт.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования высокоточными измерительными технологиями в области фотоники (скр. vniiiofi.ru), созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ» при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 05.595.21.0005 (уникальный идентификатор RFMEFI59519X0005).

#### Список литературы

1. Ковалев А. А., Либерман А. А., Микрюков А. С., Москалюк С. А., Улановский М. В. Государственный первичный эталон единицы средней мощности лазерного излучения ГЭТ 28-2013 // Измерительная техника. 2015. № 11. С. 11–15.
2. Иванов В. С., Золотаревский Ю. М., Котюк А. Ф., Либерман А. А., Саприцкий В. И., Столяревская Р. И.,

Улановский М. В., Чупраков В. Ф. Основы оптической радиометрии. М.: Физмалит, 2003. 419 с.

3. Moskalyuk S. A., Liberman A. A., Kück S., Brandt F., *Metrologia*, 2012, vol. 49(1A):02001.

<https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/1A/02001>

4. Носов П. А., Ширанков А. Ф., Третьяков Р. С., Григорьянц А. Г., Ставертий А. Я. Нагрев оптических элементов из высокочистых кварцевых стекол излучением мощных волоконных лазеров // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 12. С. 1028–1033.

<https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-12-1028-1033>

5. Власова К. В., Коновалов А. Н., Макаров А. И., Андреев Н. Ф., Кожеватов И. Е., Силин Д. Е. Синтетический кристаллический кварц как оптический материал для силовой оптики // Известия вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. Вып. 6, С. 490–498.

6. Ковалев А. А., Микрюков А. С., Москалюк С. А., Янкевич Е. Б. Калиброванный френелевский ступенчатый ослабитель мощности лазерного излучения // Измерительная техника. 2012. № 2. С. 17–21.

#### References

1. Kovalev A. A., Liberman A. A., Mikryukov A. S., Moskalyuk S. A., and Ulanovskii M. V., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 58, no. 11, pp. 1195–1199.

<https://doi.org/10.1007/s11018-016-0868-6>

2. Ivanov V. S., Zolotarevsky Yu. M., Kotyuk A. F., Liberman A. A., Sapritsky V. I., Stolyarevskaya R. I., Ulanovsky M. V., Chuprakov V. F., *Fundamentals of Optical Radiometry*, Moscow, Fizmalit Publ., 2003, 419 p. (in Russian).

3. Moskalyuk S. A., Liberman A. A., Kück S., Brandt F., *Metrologia*, 2012, vol. 49(1A):02001.

<https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/1A/02001>

4. Nosov P. A., Shirankov A. F., Tret'yakov R. S., Grigoryants A. G., Stavertiy A. Ya., *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2016, vol. 59, no. 12, pp. 1028–1033 (in Russian).

<https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-12-1028-1033>

5. Vlasova K. V., Konovalov A. N., Makarov A. I. et al., *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2019, vol. 62, no. 6, pp. 439–446. <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09989-4>

6. Kovalev A. A., Mikryukov A. S., Moskalyuk S. A., Yankevich E. B., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 55, pp. 130–136. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-9929-7>

Статья поступила в редакцию 26.08.2020;  
принята к публикации 26.09.2020.