

Результаты сличений эталонов единицы средней мощности лазерного излучения на длинах волн 0,532, 1,064 и 10,6 мкм России и Германии

А. А. ЛИБЕРМАН, С. А. МОСКАЛЮК, М. В. УЛАНОВСКИЙ, Б. Б. ХЛЕВНОЙ

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

Представлены результаты международных двусторонних дополнительных сличений национальных эталонов единицы средней мощности лазерного излучения России и Германии, проходивших с 2009 по 2012 гг.

Ключевые слова: лазерное излучение, эталон сравнения, сличение, неопределенность.

The results of international supplementary comparisons of national standards of the unit of average laser power between Russia and Germany carried out from 2009 to 2012 are presented.

Key words: laser radiation, transfer standard, comparison, uncertainty.

В рамках международного сотрудничества между Россией (ВНИИОФИ) и Германией (РТВ) в период 2009 — 2012 гг. были проведены дополнительные двусторонние сличения национальных эталонов единицы средней мощности лазерного излучения. Сличения осуществляли путем измерений чувствительности эталона сравнения, состоящего из оптической головки с разъемом, подключаемым к высокоточному мультиметру. При этом выполняли поочередные измерения чувствительности эталона сравнения на длинах волн 0,532; 1,064 и 10,6 мкм при уровне мощности 1 Вт. Лаборатория ВНИИОФИ выступала в качестве лаборатории-пилота. Сличения были зарегистрированы в КОOMET 17.03.2009 г. под порядковым номером 461/RU/09. Информация о сличениях размещена на сайте МБМВ [1] под порядковым номером COOMET.PR-S4. В качестве эталонов сравнения от ВНИИОФИ был использован Coherent PM10, а от РТВ — Ophir 30A. Описание указанных эталонов сравнения приведены в техническом протоколе сличений [2]. От каждой из сторон был представлен один эталон сравнения.

Форма сличений. Сличения проводили по следующему алгоритму: во ВНИИОФИ выполняли калибровку своего эталона сравнения и затем высылали его в РТВ; в РТВ осуществляли его калибровку и возвращали во ВНИИОФИ; во ВНИИОФИ выполняли перекалибровку своего эталона сравнения и вычисляли дрейф чувствительности за весь период сличений; в РТВ проводили калибровку своего эталона сравнения и его отсылали во ВНИИОФИ; во ВНИИОФИ осуществляли его калибровку и возвращали в РТВ; в РТВ выполняли перекалибровку своего эталона сравнения и вычисляли дрейф чувствительности за весь период сличений.

После всех проведенных измерений участники сличений обменивались результатами лабораторных измерений чувствительности мощности лазерного излучения. Чувствительность определяли как отношение выходного сигнала (в вольтах) на эталоне сравнения к оптической мощности (в милливольтах, деленных на ватт), определенной участвующей лабораторией.

Каждое независимое измерение состояло из серии измерений выходного сигнала эталона сравнения, при этом решение о количестве измерений в серии принималось каждой лабораторией самостоятельно и было обусловлено требованиями к точности для исключения влияния шумов при

бораторных измерений чувствительности мощности лазерного излучения. Чувствительность определяли как отношение выходного сигнала (в вольтах) на эталоне сравнения к оптической мощности (в милливольтах, деленных на ватт), определенной участвующей лабораторией.

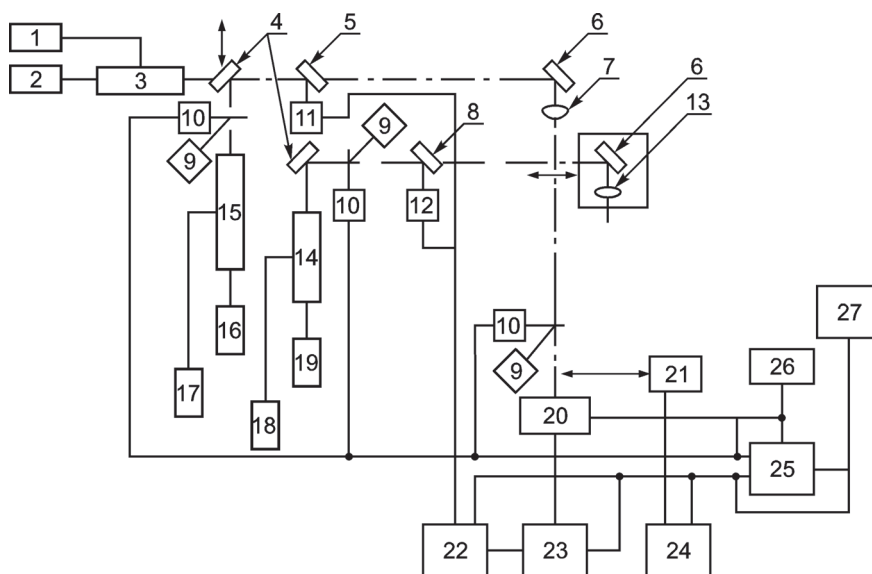


Рис. 1. Функциональная схема ГЭТ 28—2009:

1, 2 — блоки охлаждения и питания лазера 3 ($\lambda = 1,064$ мкм); 4, 6 — поворотные зеркала; 5, 8 — плоскопараллельные пластины; 7, 13 — линзы; 9 — ловушка; 10 — шторка; 11, 12 — приемники-свидетели; 14 — лазер ($\lambda = 10,6$ мкм); 15 — лазер ($\lambda = 0,532$ мкм); 16, 17 — блоки питания и охлаждения лазера 15; 18, 19 — блоки охлаждения и питания лазера 14; 20 — измерительный преобразователь; 21 — поверяемое средство измерений; 22 — блок коммутации; 23, 24 — вольтметры Keithley 2002 и Agilent 34420A; 25 — блок управления; 26 — блок электрической калибровки; 27 — компьютер

измерениях. Точное число проведенных измерений было зафиксировано в протоколе.

Участники определяли чувствительность на длинах волн 0,532; 1,064 и 10,6 мкм. Время прогрева эталонов сравнения перед измерением составляло 30 с для Coherent PM10 и 45 с — для Ophir 30A. Также измеряли выходной сигнал эталона сравнения при отсутствии оптического излучения. Все измерения проводили при мощности лазерного излучения $(1,0 \pm 0,1)$ Вт.

Модель и тип первичного эталона ГЭТ 28—2009. На рис. 1 изображена структурная схема государственного первичного эталона единицы средней мощности лазерного излучения ГЭТ 28—2009. В его состав входит измерительный преобразователь калориметрического типа, работающий по принципу замещения оптической мощности электрической. Технические характеристики лазеров, входящих в состав эталона, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики лазеров, входящих в состав ГЭТ 28—2009

Характеристика	Coherent Compass 1064—4000 M Diode — Pumped CW IR Laser (Nd: YAG)	ГЛ-10, «Плазма», CO ₂ -лазер	Coherent Verdi™ V-8 Diode — Pumped Laser (Nd: YVO ₄)
Длина волны, мкм	1,064	10,6	0,532
Выходная мощность, Вт, более	4	50	8

Технические характеристики ГЭТ 28—2009

Диапазон воспроизводимых значений средней мощности лазерного излучения $5 \cdot 10^{-3}$ — 2,0 Вт
 Рабочие длины волн 0,532; 1,064; 10,6 мкм
 Нестабильность эталона за год $1,0 \cdot 10^{-3}$.

В основу работы измерительного преобразователя ГЭТ 28—2009 положен калориметрический принцип, суть которого заключается в генерации термоЭДС, прямо пропорциональной количеству выделяемого в приемном элементе калориметра теплового потока под воздействием лазерно-

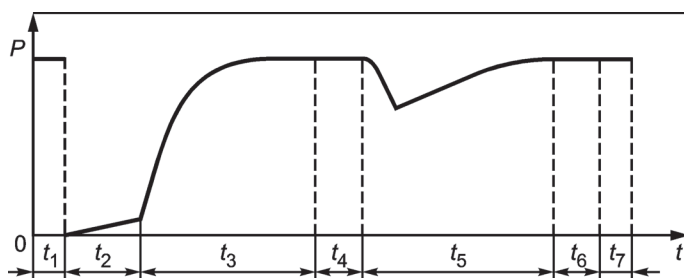


Рис. 2. Временная диаграмма проведения сличений: t_1 — оценка поданной оптической мощности по приемнику-свидетелю; t_2 — измерения нулевого уровня и дрейфа измерительного преобразователя; t_3 — подача электрической мощности в измерительный преобразователь; t_4 — измерение электрической мощности; t_5 — подача оптической мощности в измерительный преобразователь; t_6 — одновременные измерения оптической мощности и сигнала на приемнике-свидетеле; t_7 — одновременные измерения сигнала приемника сравнения и сигнала приемника-свидетеля для контроля нестабильности мощности излучения

го излучения. Для компенсации влияния теплового фона в составе измерительного преобразователя имеются два близких по своим характеристикам приемника калориметрического типа, термобатареи которых включены навстречу друг другу. Приемники помещены в массивный медный корпус (термостат).

Описание методики измерений. В рамках сличений применяли два приемника сравнения в виде приемных головок лазерного излучения: Ophir 30A, принадлежащей РТВ, и Coherent PM10, принадлежащей пилотной лаборатории ВНИИОФИ. Измерения проводили последовательным методом.

В состав ГЭТ 28—2009, как указывалось выше, входят три лазера на длинах волн 0,532, 1,064 и 10,6 мкм. Временная диаграмма измерений приведена на рис. 2. Во время проведения измерений на длинах волн 0,532 и 1,064 мкм использовался один и тот же оптический тракт. В случае работы лазера 15 на $\lambda = 0,532$ мкм (см. рис. 1) его выходное излучение отражалось от поворотного зеркала 4, в случае работы лазера 3 ($\lambda = 1,064$) мкм указанное зеркало выводилось из оптического тракта. Далее излучение попадало на плоскопараллельную пластину 5, изготовленную из стекла марки К-8, 90 % излучения проходило дальше, 10 % отражалось на вход фотодетектора 11, выступающего в качестве приемника-свидетеля для контроля нестабильности лазерного излучения. Затем излучение попадало на поворотное зеркало 6, проходило линзу, изготовленную из стекла марки К-8, и попадало на вход измерительного преобразователя ПИ-15 20.

При измерениях на $\lambda = 10,6$ мкм лазерное излучение отражалось от поворотного зеркала 4 (см. рис. 1) на плоскопараллельную пластину 8, 90 % излучения проходило дальше, 10 % отражалось на вход теплового приемника-свидетеля 12, служащего для контроля нестабильности лазерного излучения. Затем излучение попадало на поворотное зеркало 6, проходило линзу AsGa и попадало на вход измерительного преобразователя ПИ-15.

Все выходные сигналы измерялись мультиметром Keithley 2002 и регистрировались по GPIB-интерфейсу персональным компьютером. Все измерения проходили по временной диаграмме (см. рис. 2). После измерения мощности лазерного излучения с помощью измерительного преобразователя ПИ-15 перед ним помещался эталон сравнения. Лазерный пучок фокусировался в центр приемного элемента. Выходные сигналы эталона сравнения измерялись при помощи высокоточного вольтметра Agilent 34420A. Все выходные данные как измерительного преобразователя ПИ-15, так и эталонов сравнения регистрировались в автоматическом режиме при помощи персонального компьютера по разработанной программе. В ходе измерений вычислялись средние значения сигналов и стандартное отклонение.

Лабораторные условия. Температура в месте проведения сличений была на уровне (21 ± 1) °С, влажность — (60 ± 20) %. Эталоны сравнения перед процедурой сличения в течение дня выдерживали при указанных внешних условиях в комнате, где выполняли измерения.

Результаты сличений. В табл. 2 приведены результаты измерений, полученные в лаборатории ВНИИОФИ, а в табл. 3 — в лаборатории РТВ. Полное описание используемых эталонов и результатов лабораторных измерений в РТВ дано в заключительном отчете типа В [2].

Таблица 2

Результаты измерений для различных эталонов сравнения, проведенных во ВНИИОФИ

Тип лазера	λ , мкм	Мощность, Вт	Диаметр пучка, мм	T , °C	Количество измерений	Чувствительность s , мВ/Вт	Стандартная неопределенность u_s		Фактор k	Расширенная стандартная неопределенность U_s	
							%	мВ/Вт		%	мВ/Вт
Эталон сравнения Ophir 30A (май 2010 г.)											
Nd: YVO ₄	0,532	0,96794	6	22,3	5	1,50698	0,202	0,0030	2,160	0,437	0,0066
Nd: YAG	1,064	0,98957	2	22,1	5	1,45652	0,114	0,0017	2,032	0,233	0,0034
CO ₂	10,6	0,95398	6	22,4	5	1,54974	0,273	0,0042	2,201	0,601	0,0093
Эталон сравнения Coherent PM10 (декабрь 2009 г.)											
Nd: YVO ₄	0,532	0,94775	6	19,8	5	1,70696	0,235	0,0040	2,179	0,512	0,0087
Nd: YAG	1,064	0,97287	2	19,6	5	1,67174	0,157	0,0026	2,120	0,333	0,0056
CO ₂	10,6	0,91776	6	19,7	5	1,79004	1,324	0,0237	2,262	2,996	0,0536
Эталон сравнения Coherent PM10 (май 2010 г.)											
Nd: YVO ₄	0,532	0,96794	6	22,3	5	1,71367	0,208	0,0036	2,179	0,453	0,0078
Nd: YAG	1,064	0,98957	2	22,1	5	1,66760	0,116	0,0019	2,032	0,236	0,0039
CO ₂	10,6	0,95398	6	22,4	5	1,79132	0,450	0,0081	2,228	1,003	0,0180

Таблица 3

Результаты измерений для различных эталонов сравнения, проведенных в РТВ

λ , мкм	Мощность, Вт	Чувствительность s , мВ/Вт	Стандартная неопределенность u_s		Фактор k	Расширенная стандартная неопределенность U_s	
			%	мВ/Вт		%	мВ/Вт
Эталон сравнения Coherent PM10 (декабрь 2009 г.)							
0,5309	1,0	1,7120	0,12	0,0020	2,1	0,24	0,0041
1,064	1,0	1,6781	0,15	0,0025	2,4	0,35	0,0059
10,6	1,0	1,7915	0,12	0,0022	2,0	0,24	0,0043
Эталон сравнения Ophir 30A (декабрь 2009 г.)							
0,5309	1,0	1,5015	0,09	0,0013	2,0	0,17	0,0026
1,064	1,0	1,4653	0,09	0,0013	2,0	0,17	0,0025
10,6	1,0	1,5546	0,14	0,0021	2,0	0,27	0,0042
Эталон сравнения Ophir 30A (июнь 2010 г.)							
0,5309	1,0	1,5025	0,09	0,0013	2,0	0,17	0,0026
1,064	1,0	1,4659	0,09	0,0013	2,0	0,17	0,0025
10,6	1,0	1,5568	0,18	0,0028	2,1	0,38	0,0059

По окончании всех измерений в рамках дополнительных сличений эталоны сравнения были возвращены в лаборатории, которым они принадлежат, после чего лаборатории-

пилоту ВНИИОФИ были переданы результаты измерений, полученные лабораторией РТВ. В результирующем отчете типа В, подготовленном лабораторией ВНИИОФИ, были под-

робно представлены бюджеты неопределенностей проведенных сличений, полученные после обработки всех результатов измерений [2]. В табл. 4, 5 приведены окончательные результаты измерений чувствительности эталонов сравнения на заявленных в техническом протоколе сличений [2] длинах волн при уровне мощности лазерного излучения 1 Вт.

Т а б л и ц а 4

Окончательные результаты лабораторных измерений эталона сравнения Ophir 30A

Дата и место	λ , мкм	s, мВ/Вт	Фактор k	u_s , %	U_s , %
Декабрь 2009 г., РТВ	0,5309	1,5015	2,0	0,09	0,17
Май 2010 г., ВНИИОФИ	0,532	1,5070	2,2	0,20	0,44
Июнь 2010 г., РТВ	0,5309	1,5025	2,0	0,09	0,17
Декабрь 2009 г., РТВ	1,064	1,4653	2,0	0,09	0,17
Май 2010 г., ВНИИОФИ	1,064	1,4565	2,0	0,11	0,23
Июнь 2010 г., РТВ	1,064	1,4659	2,0	0,09	0,17
Декабрь 2009 г., РТВ	10,6	1,5546	2,0	0,14	0,27
Май 2010 г., ВНИИОФИ	10,6	1,5498	2,2	0,27	0,60
Июнь 2010 г., РТВ	10,6	1,5568	2,1	0,18	0,38

Т а б л и ц а 5

Окончательные результаты лабораторных измерений эталона сравнения Coherent PM10

Дата и место	λ , мкм	s, мВ/Вт	Фактор k	u_s , %	U_s , %
Декабрь 2009 г., ВНИИОФИ	0,532	1,7070	2,2	0,24	0,51
Декабрь 2009 г., РТВ	0,5309	1,7120	2,1	0,12	0,16
Май 2010 г., ВНИИОФИ	0,532	1,7137	2,2	0,21	0,45
Декабрь 2009 г., ВНИИОФИ	1,064	1,6717	2,1	0,16	0,33
Декабрь 2009 г., РТВ	1,064	1,6781	2,4	0,15	0,35
Май 2010 г., ВНИИОФИ	1,064	1,6676	2,0	0,12	0,24
Декабрь 2009 г., ВНИИОФИ	10,6	1,7900	2,3	1,32	3,00
Декабрь 2009 г., РТВ	10,6	1,7915	2,0	0,12	0,24
Май 2010 г., ВНИИОФИ	10,6	1,7913	2,2	0,45	1,00

Относительное изменение чувствительности эталона сравнения после s_{after} и до s_{before} его перевозки определяли по формуле

$$\Delta_{\text{rel}} = (s_{\text{after}} - s_{\text{before}}) / s_{\text{before}},$$

неопределенность передачи — по формуле

$$u_{\text{tr}} = |\Delta_{\text{rel}}| / (2\sqrt{3}).$$

Результаты расчетов относительного изменения чувствительности эталона сравнения после и до его перевозки, а также неопределенности передачи представлены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Результаты расчетов Δ_{rel} и u_{tr} для двух эталонов сравнения

Параметр, %	λ , мкм		
	0,532	1,064	10,6
Ophir 30A			
Δ_{rel}	0,07	0,04	0,14
u_{tr}	0,02	0,01	0,04
Coherent PM10			
Δ_{rel}	0,39	0,25	0,07
u_{tr}	0,11	0,07	0,02

Относительная разница между результатами измерений, проведенных во ВНИИОФИ и РТВ, определялась как

$$\Delta_{\text{ВНИИОФИ-РТВ}} = (s_{\text{ВНИИОФИ}} - s_{\text{РТВ}}) / s_{\text{РТВ}},$$

относительная суммарная неопределенность сличений ВНИИОФИ и РТВ — выражением

$$u_{\text{ВНИИОФИ-РТВ}} = \sqrt{u_{\text{ВНИИОФИ}}^2 + u_{\text{РТВ}}^2 + u_{\text{tr}}^2}.$$

Среднюю чувствительность $s_{\text{РТВ}}$ и стандартную неопределенность $u_{\text{РТВ}}$ для эталона сравнения Ophir 30A вычисляли как средние арифметические средних значений этих величин по двум сериям измерений, выполненным в разные сроки:

$$s_{\text{РТВ}} = (s_{\text{РТВ (December)}} + s_{\text{РТВ (June)}}) / 2;$$

$$u_{\text{РТВ}} = (u_{\text{РТВ (December)}} + u_{\text{РТВ (June)}}) / 2.$$

Аналогичным образом рассчитывали эти параметры для эталона сравнения Coherent PM10:

$$s_{\text{ВНИИОФИ}} = (s_{\text{ВНИИОФИ (December)}} + s_{\text{ВНИИОФИ (May)}}) / 2;$$

$$u_{\text{ВНИИОФИ}} = (u_{\text{ВНИИОФИ (December)}} + u_{\text{ВНИИОФИ (May)}}) / 2.$$

В табл. 7 и на рис. 3 (в виде зависимостей относительной разницы результатов измерений чувствительности эталонов сравнения между двумя лабораториями от длины волны лазерного излучения) представлены результаты сличений для эталонов сравнения Ophir 30A и Coherent PM10.

Таблица 7

Результаты сличений для двух эталонов сравнения

Параметр, %	λ , мкм		
	0,532	1,064	10,6
Ophir 30A			
$\Delta_{V_{NIIOFI-PTB}}$	0,33	-0,62	-0,38
$u_{V_{NIIOFI}}$	0,20	0,11	0,27
u_{PTB}	0,09	0,09	0,16
u_{tr}	0,02	0,01	0,04
$u_{V_{NIIOFI-PTB}}$	0,22	0,14	0,32
Coherent PM10			
$\Delta_{V_{NIIOFI-PTB}}$	-0,10	-0,50	-0,05
$u_{V_{NIIOFI}}$	0,22	0,14	0,89
u_{PTB}	0,12	0,15	0,12
u_{tr}	0,11	0,07	0,02
$u_{V_{NIIOFI-PTB}}$	0,27	0,22	0,90

Заключение. На заседании технического комитета COOMET, проходившего 22-23 мая 2012 г. в Киеве, был заслушан доклад и утвержден окончательный отчет по сличениям. Результаты сличений были переданы МБМВ для их утверждения и публикации на официальном сайте [1]. Был подготовлен проект таблицы калибровочных и измерительных возможностей ВНИИОФИ.

Проведенные сличения продемонстрировали сходимость результатов, полученных в двух лабораториях. 19 октября 2012 г. было получено уведомление от координатора МБМВ, что сличения завершены и их результаты опубликованы на официальном сайте бюро [1].

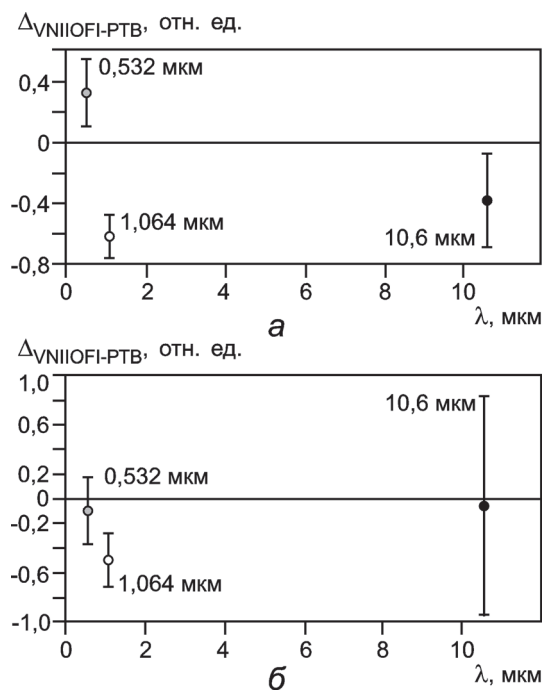


Рис. 3. Результаты сличений для Ophir 30A (а) и Coherent PM10 (б)

26 февраля 2013 г. были добавлены три строки в таблицу калибровочных и измерительных возможностей ВНИИОФИ по чувствительности и мощности лазерного излучения, размещенную на официальном сайте МБМВ.

Литература

1. **BIPM** [Офиц. сайт]. <http://www.bimp.org> (дата обращения 30.04.2013 г.).
2. **COOMET.PR-S4** Technical Protocol [Официальный сайт]. http://kcdb.bipm.org/appendixB/appbresults/COOMET.PR-S4/COOMET.PR-S4_Technical_Protocol.pdf (дата обращения 30.04.2013 г.).
3. **COOMET.PR-S4** Final Report, 2011 [Офиц. сайт]. http://www.bipm.org/utills/common/pdf/final_reports/PR/S4/COOMET.PR-S4.pdf (дата обращения 30.04.2013 г.).

Дата принятия 14.05.2013 г.