

УДК 535.23: 53.082.52

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ НА ТОЧНОСТЬ КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Длугунович В.А., Исаевич А.В., Круплевич Е.А., Насенник Л.Н.

Институт физики НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: e.kruplevich@dragon.bas-net.by

Исследовано влияние стабильности мощности и спектральных характеристик излучения лазеров, входящих в состав комплекса установок для калибровки средств измерений мощности и энергии лазерного излучения, который обеспечивает воспроизведение единицы средней мощности лазерного излучения в динамическом диапазоне от 10^{-7} до 40 Вт и единицы энергии лазерного излучения – от 10^7 до 100 Дж с относительной стандартной неопределенностью, не превышающей 3 % в спектральном диапазоне от 0,2 до 10,6 мкм, на результаты калибровки средств измерений.

Ключевые слова: калибровка, мощность, энергия, лазерное излучение.

Введение

Высокая точность в сочетании с широким динамическим и спектральным диапазонами измерений современных средств измерений (СИ) мощности и энергии лазерного излучения (ЛИ) предъявляют повышенные требования к установкам для их калибровки, которые должны обеспечивать хранение, воспроизведение и передачу размера единиц средней мощности и энергии ЛИ калибруемым СИ.

При этом точность, динамический и спектральный диапазоны измерений калибровочных установок должны быть значительно выше, чем у калибруемых СИ.

Одним из условий воспроизведения размера единиц средней мощности и энергии излучения в широком спектральном диапазоне с минимальной неопределенностью является комплекция калибровочных установок высокостабильными источниками ЛИ, обеспечивающими генерацию излучения во всем спектральном диапазоне с требуемыми параметрами.

Цель работы – исследовать основные характеристики излучения лазерных источников, оказывающие наибольшее влияние на точность калибровки СИ средней мощности и энергии ЛИ: стабильность мощности и энергии, спектральные характеристики (длину волны, спектральную ширину полосы) излучения; использовать результаты исследований при создании

комплекса установок для калибровки СИ мощности и энергии ЛИ.

Энергетические и спектральные характеристики источников лазерного излучения, входящих в состав установок для калибровки средств измерений мощности (энергии) лазерного излучения

Основными параметрами источников ЛИ для установок комплекса, которые необходимо учитывать при их выборе, являются, в первую очередь: динамический диапазон выходной мощности (энергии) ЛИ, долговременная стабильность мощности (энергии) излучения, его спектральный диапазон, спектральный состав и спектральная ширина полосы излучения, а также характеристики надежности лазеров (рабочий ресурс, шумы, устойчивость к напряжениям радиопомех, создаваемых на портах электропитания). Кроме того, при выборе лазеров важны пространственные характеристики пучка излучения и поляризация ЛИ.

При калибровке СИ мощности (энергии) ЛИ наибольшее влияние на суммарную стандартную неопределенность определения калибровочного коэффициента имеет долговременная стабильность мощности (энергии) ЛИ. Согласно требованиям стандарта [1] стабильность мощности ЛИ характеризуется относительной статистической флуктуацией мощности ЛИ ΔP за интервал вре-

мени измерения выбранного типа стабильности, которую вычисляют по формуле:

$$\Delta P = 2s/\bar{P},$$

где $\bar{P} = \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) / n$ – среднее значение мощности

ЛИ; $s = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 / (n-1) \right)}$ – стандартное

отклонение; n – количество измерений.

Стабильность мощности излучения лазеров зависит от ряда факторов: типа, конструкции и режима работы лазеров, а также от условий их эксплуатации и параметров накачки.

На рисунке 1 проиллюстрирована зависимость долговременной стабильности мощности излучения (3600 измерений в течение 1 ч) лазерного модуля MDL-H-880nm-2W от уровня выходной мощности. Видно, что при прочих одинаковых факторах стабильность мощности излучения при различных уровнях выходной мощности может отличаться более чем в 3 раза.

Результаты измерений долговременной стабильности мощности ЛИ, проводимых в соответствии с требованиями стандарта [1] для разных уровней мощности ЛИ лазеров, входящих в состав установки для калибровки СИ мощности ЛИ (УКСИМ), представлены в таблице 1. Установлено, что используемые в установке УКСИМ лазеры обладают высокой долговременной стабильностью мощности излучения, которая изменяется в зависимости от уровня выходной мощности лазеров и их типа в пределах от 0,02 % до 3,0 %.

Стабильность энергии импульса ЛИ характеризуется относительной статистической флуктуацией энергии импульса ΔQ , которую согласно требованиям стандарта [1] вычисляют аналогично статистической флуктуации мощности ЛИ ΔP по формуле:

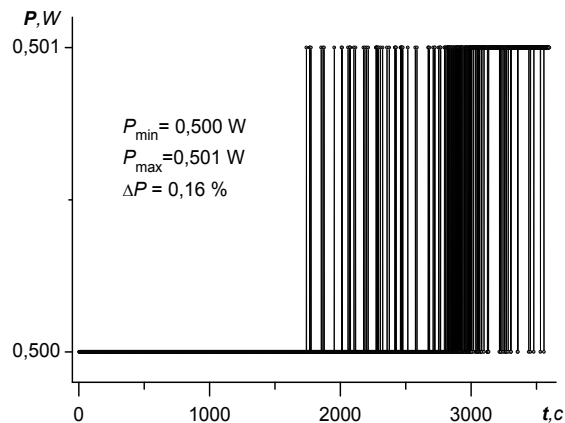
$$\Delta Q = 2s/\bar{Q},$$

где $\bar{Q} = \left(\sum_{i=1}^n Q_i \right) / n$ – среднее значение энергии

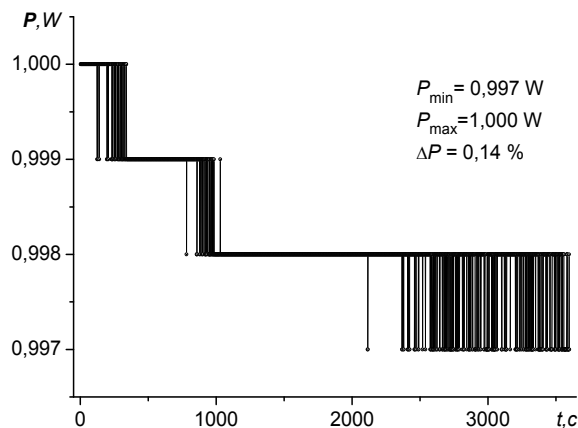
импульса; $s = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 / (n-1) \right)}$ – стандарт-

ное отклонение; n – количество измерений. Измерения выполняют для 100 последовательных (если

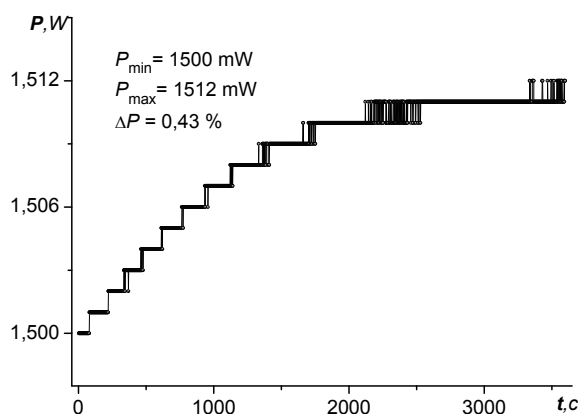
возможно) импульсов. Если это невозможно, то разрешается использовать 100 импульсов, которые непосредственно не следуют друг за другом.



а



б



в

Рисунок 1 – Временные зависимости выходной мощности излучения лазерного модуля MDL-H-880nm-2W при уровнях мощности лазерного излучения: а – 500, б – 1000, в – 1500 мВт

Данные, представленные в таблице 1, получены авторами в центре испытаний лазерной техники на установке для измерения средней мощности непрерывного ЛИ и поверки средств измерения средней мощности ЛИ, комплексе установок для измерения спектральных характе-

ристик лазерного излучения и на установке для измерения стабильности мощности ЛИ [2, 3].

Значения стабильности энергии лазеров, входящих в установку для калибровки средств измерений энергии ЛИ (УКСИЭ), представлены в таблице 2.

Таблица 1

Источники непрерывного лазерного излучения установки для калибровки средств измерений мощности лазерного излучения и их характеристики

Модель лазера	Средняя мощность, Вт	Долговременная стабильность, %	Длина волны, нм
МЛ800-0405-100	0,005–0,1	0,4–1,0	404
МЛ800-0447-700	0,005–0,7	0,02–0,08	450
LCS-DTL-322	0,005–2,1	0,8–1,8	532
LRD-635-TFM-200-01	0,27	0,49	635
56ICS153	0,03	0,1	662
МЛ800-0750-1000	0,005–1,1	0,1–0,3	748
MDL-N-808nm-10W	0,1–10,5	0,15	808
MDL-H-880nm-2W	0,1–2,1	0,2–0,5	878
ATC-C3000-500-AMF-975-10	0,01–3,0	0,9–3,0	975
LCS-DTL-318	0,005–0,5	0,13–0,86	1 064
MIL-III-1342nm-800mW	0,1–0,92	0,11–0,26	1 342
LRD-1560-NFM-00500-03	0,69	0,76	1 562
Firestar V30	0,1–59,2	1,4–1,8	10 600

Таблица 2

Источники импульсного лазерного излучения установки для калибровки средств измерений мощности лазерного излучения и их характеристики

Модель лазера	Длина волны, нм	Длительность импульса, с	Максимальная энергия, Дж	Стабильность, %
LS-2134	266	$11 \cdot 10^{-9}$	0,029	5,0
	355	$11 \cdot 10^{-9}$	0,036	5,0
	532	$11 \cdot 10^{-9}$	0,15	3,0
	1064	$11 \cdot 10^{-9}$	0,25	2,5
LQ929	532	$9 \cdot 10^{-9}$	0,88	3,0
	1064	$9 \cdot 10^{-9}$	1,48	2,5
L-1064/755	755	$5 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$	20	3,0
	1064	$5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$	100	3,0
ЛТИ-139	1535	$3 \cdot 10^{-6}$	0,12	3,5

Анализ характеристик существующих измерителей мощности (энергии) ЛИ показал, что существенными отличиями современных измерителей энергетических характеристик ЛИ являются широкий спектральный и динамический диапазоны измерений в сочетании с высокой точностью, которые достигаются за счет использования как различного вида термоэлектрических, так и фотоэлектрических, пироэлектрических и других типов первичных приемных оптоэлектрических преобразователей. Однако чувствительность современных измерителей энергетических характеристик ЛИ достаточно сильно зависит от длины волны и спектрального состава излучения. Особенно такая сильная зависимость наблюдается для фотодиодных измерителей мощности (энергии) ЛИ, основанных на преобразовании энергии фотонов оптического излучения в электрические сигналы. Поэтому калибровка таких СИ должна проводиться с использованием источников ЛИ, длины волн излучения которых незначительно отличаются от рабочих длин волн излучения, на которых осуществляется эксплуатация СИ мощности (энергии) ЛИ. А это предполагает наличие в установках для калибровки СИ мощности (энергии) ЛИ набора источников ЛИ, генерирующих излучение на различных длинах волн.

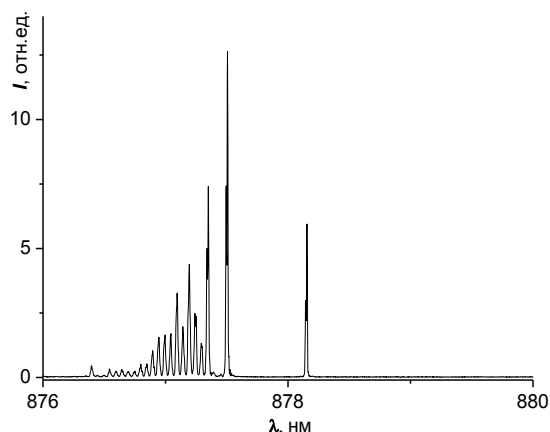
Подтверждением этому является сравнение результатов измерений средней мощности излучения лазерных модулей МЛ800-0405-100 (длина волны излучения $\lambda = 404$ нм), МЛ800-0447-700 ($\lambda = 450$ нм) и МЛ800-0750-1000 ($\lambda = 748$ нм) с помощью эталонного измерителя установки для измерения средней мощности непрерывного ЛИ и поверки СИ средней мощности ЛИ [2], а также измерителя «LaserStar» фирмы «Ophir Optronics» с различными измерительными фотодиодными (PD300-SH, PD300-3W-V1, PD300-UV-SH) и термоэлектрическими детекторами (10A-P-V2-SH, 30A-SH-V1). Калибровка измерительных детекторов «Ophir Optronics» проводилась на длине волны излучения 1064 нм, спектральная чувствительность детекторов корректировалась автоматически с помощью набора соответствующих коэффициентов. При измерениях мощности ЛИ с длиной волны 748 нм показания эталонного СИ и измерителя «LaserStar» с различными измерительными детекторами отличались не более чем на 2 %.

Такие же различия показаний наблюдаются и для ЛИ с длинами волн 404 и 450 нм при сравнении эталонного СИ и измерителя «La-

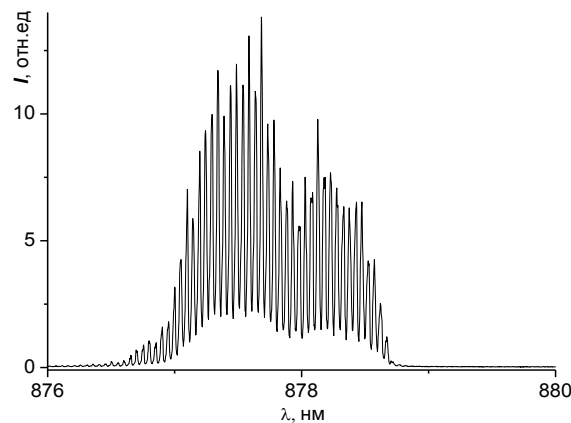
serStar» с термоэлектрическими измерительными детекторами. Однако для фотодиодных детекторов, чувствительность которых в этом спектральном диапазоне резко изменяется, эти различия превышали 10 %.

Измерения спектральных характеристик лазеров проводились на комплексе установок для измерений спектральных характеристик ЛИ [3] в соответствии с требованиями стандарта [4]. Результаты измерений длин волн излучения лазеров, используемых в установках комплекса, представлены в таблицах 1 и 2. Видно, что обеспечен достаточно широкий динамический диапазон средней мощности и энергии ЛИ в спектральной области от 0,2 до 10,6 мкм.

С изменением мощности генерации используемых в установке полупроводниковых лазеров и лазеров с диодной накачкой изменяются спектральные характеристики генерируемого ими излучения. Это видно на примере спектрального распределения плотности мощности излучения лазерного модуля MDL-H-880nm-2W с длиной волны генерации 878 нм при уровнях выходной мощности ЛИ 560, 1300 и 2100 мВт (рисунок 2).



а



б

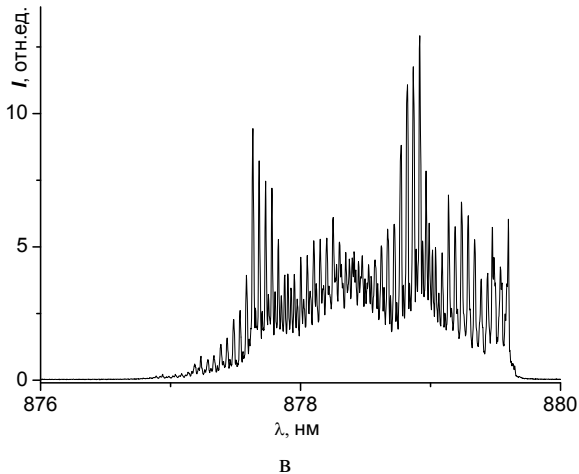


Рисунок 2 – Спектры излучения лазерного модуля MDL-H-880nm-2W при мощностях лазерного излучения: а – 560, б – 1300, в – 2100 мВт

С увеличением мощности генерации происходит изменение структуры спектра излучения, а также его сдвиг в длинноволновую область, обусловленный температурным изменением ширины запрещенной зоны активной среды лазера и дисперсионно-температурной зависимостью эффективного показателя преломления оптического микрорезонатора.

Сдвиг спектра при изменении мощности ЛИ составляет несколько нанометров и для ряда лазеров длина волны излучения практически линейно возрастает с увеличением мощности ЛИ (используются промышленно выпускаемые лазеры, стабилизация всех параметров и характеристик предусмотрена конструкцией лазера) (рисунок 3).

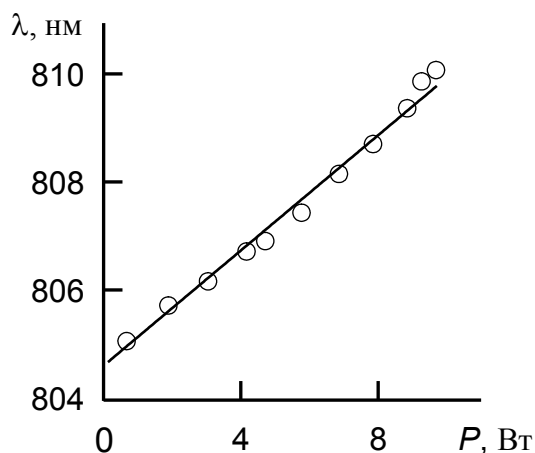


Рисунок 3 – Зависимость центральной длины волны излучения лазерного модуля MDL-N-808nm-10W от мощности лазерного излучения

Такие изменения спектральных характеристик ЛИ необходимо учитывать при калибровке измерителей мощности (энергии) ЛИ, чувствительность которых сильно зависит от длины волны и спектрального состава излучения (например, фотодиодных).

Схема построения, принцип работы и элементная база установок комплекса

Проведенные исследования позволили реализовать требования, предъявляемые к калибровочным установкам, в Институте физики НАН Беларуси, где на основе современной элементной базы создан комплекс для калибровки СИ мощности и энергии ЛИ в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ ИСО 11554-2007 и СТБ МЭК 61040-2004, гармонизованных с международными нормами [1, 5]. Комплекс входит в систему эталонов, измерительных и калибровочных установок, обеспечивающих систему единства измерений в области лазерной техники в Республике Беларусь [6, 7].

В состав комплекса для калибровки СИ мощности и энергии ЛИ вошли установки УКСИМ и УКСИЭ. Анализ тенденций развития эталонных калибровочных установок показал, что в настоящее время существует несколько схем построения установок для калибровки СИ мощности и энергии ЛИ [8]. Каждая схема имеет свои достоинства и недостатки, а также область применения. Выбор был сделан в пользу последовательной схемы калибровки СИ с использованием приемника-«свидетеля».

Преимуществом данной схемы является то, что по сравнению с параллельной схемой она обеспечивает более высокие метрологические характеристики воспроизведения единиц средней мощности либо энергии ЛИ и передачи их размера, имеет менее жесткие требования к стабильности мощности ЛИ и позволяет использовать в составе установок менее мощные лазеры. Кроме того, использование приемника-«свидетеля» позволяет сэкономить рабочий ресурс эталонного СИ.

Структурная схема с использованием последовательного способа воспроизведения единицы средней мощности (энергии) ЛИ и передачи ее размера, предполагает измерения значений мощности (энергии) ЛИ с помощью эталонного СИ и последующей установки на его место калибруемого СИ. При этом с помощью приемника-«свидетеля», на который отводится

часть излучения лазера, фиксируется возможное относительное изменение мощности (энергии) источника ЛИ в процессе проведения передачи размера соответствующей единицы.

Блок-схема установок комплекса приведена на рисунке 4. Излучение лазера 1 с помощью оптической системы формирования пучка 2 направляется на приемный элемент эталонного СИ 5, а затем на калибруемое СИ 6, которое устанавливается вместо образцового СИ. Часть ЛИ с помощью светоделительной пластинки 3 направляется на приемник-«свидетель» 10, с помощью которого производится контроль стабильности мощности (энергии) ЛИ в процессе проведения калибровки. Для обеспечения калибровки СИ средней мощности (энергии) ЛИ в заданных точках динамического диапазона используются ослабители излучения 4. Калибровка приемника-«свидетеля» осуществляется путем сличения его показаний с показаниями эталонного СИ 5. Сигналы с эталонного СИ и приемника-«свидетеля» через устройства согласования 7 и 9 поступают на персональный компьютер 8, с помощью которого выполняется обработка сигналов и осуществляется управление работой установок.

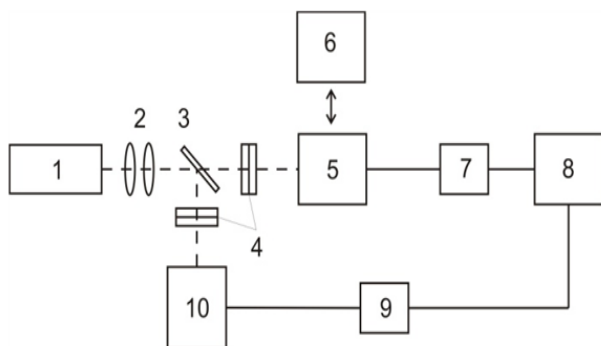


Рисунок 4 – Блок-схема установок для калибровки средств измерений мощности и энергии лазерного излучения: 1 – блок излучателей; 2 – блок формирования пучка; 3 – светоделительная пластинка; 4 – ослабители лазерного излучения; 5 – эталонное средство измерения; 6 – калибруемое средство измерения; 7 и 9 – устройства согласования; 8 – персональный компьютер; 10 – приемник-«свидетель»

Анализ требований заказчиков к калибровке СИ, используемых в Республике Беларусь, показал, что спектральный диапазон комплекса должен составлять от 0,2 до 10,6 мкм. Поэтому блок излучателей установки комплекса УКСИМ был укомплектован лазерами, обеспе-

чивающими двенадцать рабочих длин волн и динамический диапазон от 10^{-7} до 40 Вт при воспроизведении единицы средней мощности ЛИ и калибровке СИ. Динамический диапазон установки для калибровки СИ энергии УКСИЭ составляет от 10^{-7} до 100 Дж и обеспечивается пятью рабочими длинами волн при воспроизведении единицы энергии ЛИ и калибровке СИ.

Метрологические характеристики комплекса

При проведении метрологической аттестации установок комплекса УКСИМ и УКСИЭ оценивались суммарные относительные стандартные неопределенности воспроизведения размера единицы средней мощности и энергии ЛИ (таблица 3), а также их составляющие для малых, средних и больших уровней мощности (энергии). Суммарная относительная стандартная неопределенность воспроизведения размера единицы средней мощности ЛИ $u_{rel,c}$ на УКСИМ рассчитывалась по формуле:

$$u_{rel,c} = \sqrt{u_{rel}^2(\bar{P}) + u_{rel,\varepsilon}^2 + u_{rel,p}^2 + u_{rel,\eta}^2 + u_{rel,\tau}^2 + u_{rel,\varepsilon\tau}^2},$$

где $u_{rel}(\bar{P})$ – относительная стандартная неопределенность результата измерений среднего значения мощности; $u_{rel,\varepsilon}$ – относительная стандартная неопределенность измерения средней мощности ЛИ, обусловленная систематическим изменением свойств измерительной системы и определяемая через отклонения показаний \bar{P} эталонного измерительного преобразователя (ЭИП) УКСИМ от значений мощности излучения $P_{\varepsilon\tau}$, измеряемой мобильным эталоном средней мощности; $u_{rel,p}$ – относительная стандартная неопределенность, обусловленная разрешающей способностью ЭИП УКСИМ; $u_{rel,\eta}$ – относительная стандартная неопределенность передачи размера единицы мощности ЛИ, обусловленная непостоянством свойств дополнительного приемника излучения («свидетеля»); $u_{rel,\tau}$ – относительная стандартная неопределенность измерения коэффициента пропускания τ ослабителей ЛИ, установленных перед измерителем мощности; $u_{rel,\varepsilon\tau}$ – относительная стандартная

неопределенность измерений мощности излучения на мобильном эталоне средней мощности, оцененная при его аттестации.

Таблица 3

Максимальные значения суммарной относительной стандартной неопределённости $u_{rel,c}$ воспроизведения размера единицы средней мощности и энергии лазерного излучения

Мощность		Энергия	
Длина волны, нм	$u_{rel,c}$, %	Длина волны, нм	$u_{rel,c}$, %
405	1,8	355	2,9
450	0,9	532	2,6
532	2,1	755	2,8
636	2,6	1064	2,7
750	1,2	1535	2,3
808	2,6		
879	2,7		
975	2,9		
1064	2,1		
1342	2,1		
1560	2,3		
10600	2,5		

Суммарная относительная стандартная неопределенность воспроизведения размера единицы энергии ЛИ $u_{rel,c}$ на УКСИЭ рассчитывалась по аналогичной формуле.

В результате метрологической аттестации установлено, что суммарная стандартная неопределённость воспроизведения размера единицы средней мощности и энергии ЛИ на установках комплекса не превышает 3 %.

Заключение

Исследованы зависимости суммарной стандартной неопределенности калибровки средств измерений мощности (энергии) лазерного излучения от спектральных характеристик и стабильности мощности (энергии) излучения лазеров, входящих в состав комплекса для калибровки средств измерений мощности и энергии лазерного излучения.

Результаты исследований использованы при создании комплекса для калибровки

средств измерений мощности и энергии лазерного излучения, позволяющего расширить динамический и спектральный диапазоны калибровки средств измерений мощности и энергии лазерного излучения, уменьшить неопределенности измерений, более полно удовлетворять запросы по калибровке предприятий и организаций, производящих и использующих лазерную технику.

Список использованных источников

- ГОСТ ИСО 11554-2007. Оптика и фотоника. Лазеры и относящееся к лазерам оборудование. Методы испытаний для определения мощности, энергии и временных характеристик лазерного излучения. Введ. 2008–06–01. Минск : Госстандарт, 2008. – 18 с.
- Kruplevich, E. Setup for cw laser average power and pulse laser energy measurements and laser average power and laser pulse energy detectors calibration / E. Kruplevich, L. Nasennik, V. Chernikov // Proceed. SPIE. – 2006. – Vol. 6251. – P. 62510N-1–6.
- Исаевич, А.В. Комплекс установок для измерения спектральных характеристик лазерного излучения / А.В. Исаевич, В.С. Черников, А.В. Холенков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. физ.-мат. науки. – 2008. № 6. – С. 137–145.
- СТБ ИСО 13695-2005. Оптика и фотоника. Лазеры и относящееся к лазерам оборудование. Методы испытаний при определении спектральных характеристик лазеров. – Минск : Госстандарт, 2006. – 22 с.
- СТБ МЭК 61040-2004. Детекторы, измерительные приборы и оборудование для измерения мощности и энергии лазерного излучения. – Минск : Госстандарт, 2005. – 8 с.
- СТБ 8014-2000. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Калибровка средств измерений. Организация и порядок проведения. – Минск : Госстандарт, 2001. – 9 с.
- СТБ ИСО/МЭК 17025-2007. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – Минск : Госстандарт, 2007. – 28 с.
- Иванов, В.С. Фотометрия и радиометрия оптического излучения. Книга 1. Введение в фотометрию и радиометрию лазерного излучения / В.С. Иванов, А.Ф. Котюк. – М. : Полиграфсервис, 2000. – 192 с.

**EFFECT OF LASERS CHARACTERISTICS ON THE ACCURACY
OF LASER METERS CALIBRATION**

Dhugunovich V.A., Isaevich A.V., Kruplevich E.A., Nasennik L.N.

Institute of Physics of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus
e-mail: e.kruplevich@dragon.bas-net.by

Abstract. Investigated the influence of power stability and spectral characteristics of the radiation of the lasers included in the complex of setups for calibration of laser power and energy meters which provides reproducibility of the unit of average laser power in the range from 10^{-7} to 40 W and laser energy in the range from 10^{-7} to 100 J with a relative standard uncertainty not more than 3 % at the wavelengths range from 0,2 up to 10,6 μm for the results of calibration of measuring instruments.

Keywords: calibration, power, energy, laser radiation.

References

1. GOST ISO 11554-2007. Optics and photonics. Lasers and laser-related equipment. Test methods for laser beam power. Energy and temporal characteristics. Minsk, Gosstandart, 2008, 18 p. (In Russian).
2. Kruplevich E., Nasennik L., Chernikov V. Setup for cw laser average power and pulse laser energy measurements and laser average power and laser pulse energy detectors calibration. *Proceed. SPIE*, 2006, vol. 6251, pp. 62510N-1-6.
3. Isaevich A.V., Chernikov V.S., Holenkov A.V. [Complex of setups for measurement of the spectral characteristics of the laser radiation]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Ser. fiz.-mat. nauki*, 2008, no. 6, pp. 137-145 (in Russian).
4. STB ISO 13695-2005. Optics and photonics. Lasers and laser-related equipment. Test methods for the spectral characteristics of lasers. Minsk, Gosstandart, 2006, 22 p. (In Russian).
5. STB IEC 61040-2004. Power and energy measuring detectors, instruments and equipment for laser radiation. Minsk, Gosstandart, 2005, 8 p. (In Russian).
6. STB 8014-2000. System for ensuring the uniformity of measurements of Byelorussia. Measuring instrument calibration. Organization and procedure. Minsk, Gosstandart, 2001, 9 p. (In Russian).
7. STB ISO / IEC 17025-2007. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Minsk, Gosstandart, 2007, 28 p. (In Russian).
8. Ivanov V.S., Kotjuk A.F. *Fotometriya i radiometriya opticheskogo izlucheniya. Kniga 1. Vvedenie v fotometriyu i radiometriyu lazernogo izlucheniya* [Photometry and radiometry of the optical radiation. Book 1. Introduction to the photometry and radiometry of the laser radiation]. Moscow, Poligraf servis Publ., 2000, 192 p.

Поступила в редакцию 29.09.2014.