

Монохроматический источник излучения на основе суперконтинуум-лазера для измерения спектральной чувствительности приёмников излучения в диапазоне 0,9–1,6 мкм с использованием абсолютного криогенного радиометра

А. Ю. Дунаев, А. С. Батурин, В. Н. Крутиков, С. П. Морозова

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Российская Федерация, e-mail: dunaev@vniiofi.ru, baturin@vniiofi.ru,
krutikov@vniiofi.ru, morozova-m4@vniiofi.ru

Для повышения точности измерений спектральной чувствительности в диапазоне 0,9–1,6 мкм в состав установки на основе абсолютного криогенного радиометра введён усовершенствованный монохроматический источник излучения со спектральной шириной 4 нм на основе суперконтинуум-лазера и двойного монохроматора. Разработана система обратной связи, обеспечивающая стабилизацию мощности монохроматического излучения со средним квадратичным отклонением 0,025 %. Мощность оптического излучения в плоскости детектора и/или абсолютного криогенного радиометра варьируется от 0,1 до 1,5 мВт. Приведено спектральное распределение мощности разработанного источника при различных режимах работы суперконтинуум-лазера.

Ключевые слова: радиометрия, приёмники излучения, спектральная чувствительность, абсолютный криогенный радиометр, суперконтинуум лазер.

Введение. Разработка высокоточных методов и технических средств измерений оптической мощности с использованием фотонных приёмников излучения в ближнем инфракрасном диапазоне позволяет повысить достоверность и информативность измерений. Это важно при разработках методов и средств дистанционного зондирования Земли, для повышения эффективности применяемых в солнечной электроэнергетике фотовольтаических преобразователей, а также при применении детекторов для оптических информационных систем [1–3].

В настоящее время абсолютный криогенный радиометр (АКР) является наиболее перспективным эталонным приёмником оптического излучения, который позволяет устанавливать и поддерживать шкалу оптической мощности в широком спектральном диапазоне (от ультрафиолетового до инфракрасного). Он позволяет выполнять радиометрические измерения с наименьшими неопределённостями. Криогенный радиометр – полостной неселективный приёмник с электрическим замещением [4, 5], который определяет мощность оптического излучения, попадающего в поглощающую полость, измеряя эквивалентное количество электрической мощности, необходимой для поддержания полости при заданной температуре в условиях отсутствия оптического излучения.

В ведущих метрологических институтах установки на основе АКР применяют для воспроизведения и передачи

значений спектральной чувствительности приёмникам излучения [4–6]. Наивысшая точность измерения спектральной чувствительности на установке с АКР достигается при использовании монохроматического излучения мощностью 0,02–2,0 мВт [4, 7].

Однако традиционные источники на основе монохроматора и лампы накаливания или чёрного тела не обеспечивают требуемой мощности монохроматического излучения [7]. Наиболее перспективным источником излучения для применения в установке, предназначенной для измерения спектральной чувствительности, является лазерный источник суперконтинуума (далее – суперконтинуум-лазер) [8], который имеет широкий непрерывный спектр – от видимой до инфракрасной области. Стабильность источника излучения – одна из основных составляющих неопределённости радиометрических измерений.

Цель настоящей работы – измерение оптической мощности и исследование путей стабилизации монохроматического излучения при измерениях спектральной чувствительности приёмников излучения в диапазоне 0,9–1,6 мкм.

Установка для измерения спектральной чувствительности. Измерение спектральной чувствительности включает в себя измерение мощности излучения $P_0(\lambda)$, поглощённого приёмной полостью АКР. Затем этим же потоком облучается исследуемый приёмник и измеряется выходной сигнал исследуемого приёмника: ток $I(\lambda)$ или напряжение

$U(\lambda)$ в зависимости от типа приёмника. Спектральные чувствительности $S_I(\lambda)$, $S_U(\lambda)$ исследуемого приёмника определяются выражениями

$$S_I(\lambda) = I(\lambda)/P_0(\lambda);$$

$$S_U(\lambda) = U(\lambda)/P_0(\lambda).$$

Функциональная схема усовершенствованной установки для измерения спектральной чувствительности приёмников представлена на рис. 1 и в основном соответствует установке, описанной в работе [9]. Основными элементами установки являются: блок источников излучения, двойной субтрактивный монохроматор; блок асферической оптики в термостатированном корпусе; система исследования приёмников оптического излучения на основе АКР.

Усовершенствованный монохроматический источник построен на основе суперконтинуум-лазера – системы WhiteLase SuperContinuum 400-4 (производство компании

Fianium Ltd, Великобритания) с полной мощностью излучения 4 Вт, распределённой в спектральном диапазоне 0,4–2,5 мкм (Fianium Whitelase, High Power Supercontinuum Fiber Lasers, NKT Photonics, Inc [сайт]. URL: <https://www.nktp Photonics.com/wp-content/uploads/sites/3/2016/05/fianium-whitelase.pdf>). Суперконтинуум-лазер формирует импульсное излучение длительностью импульса 4 пс и частотой повторения 20 МГц.

Для сопряжения суперконтинуум-лазера с монохроматором разработан и изготовлен специальный узел, содержащий зеркальные расширитель 2 и блок фокусировки 3 (см. рис. 1). Расширитель представлен системой из двух расположенных концентрично сферических зеркал. Такая система расширяет луч лазера диаметром 5 мм до параллельного пучка диаметром 30 мм. За вторым зеркалом расширителя располагается оптическая система, состоящая из плоского и внеосевого параболического зеркал и фокусирующая излучение на входной щели монохроматора McPherson 2035D.

Монохроматор, построенный по схеме Черни–Тернера, работает в субтрактивном режиме. При работе в

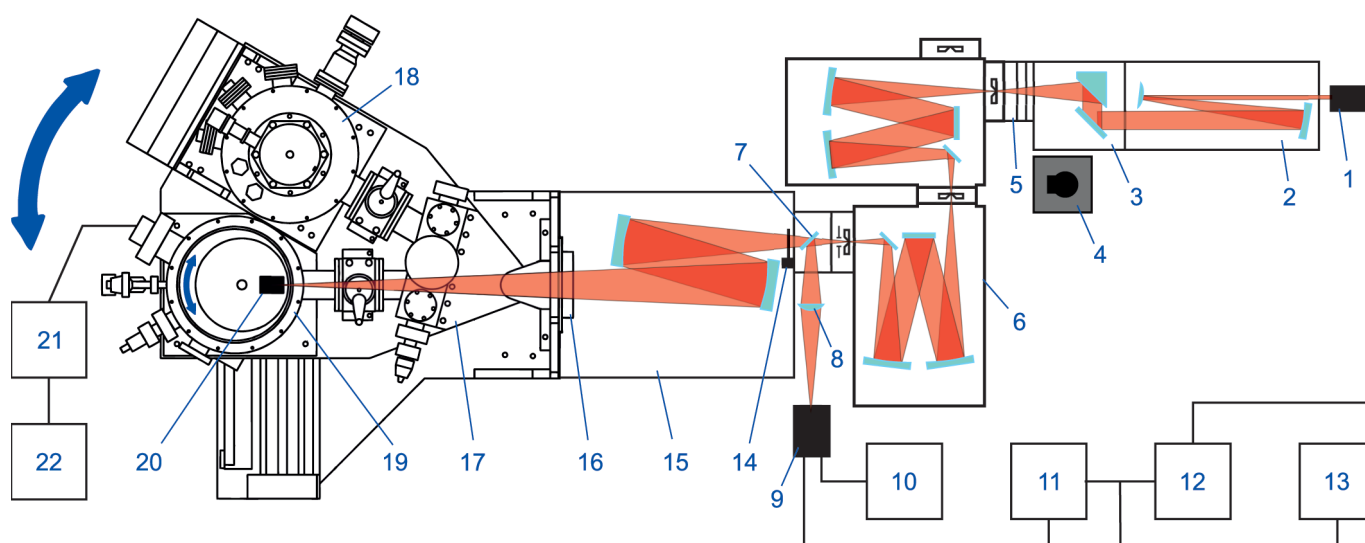


Рис. 1. Функциональная схема установки для измерения спектральной чувствительности приёмников излучения в диапазоне длин волн 0,9–1,6 мкм:

1 – излучатель суперконтинуум-лазера; 2 – зеркальный расширитель лазерного луча; 3 – блок фокусировки; 4 – спектральная лампа; 5 – колесо отрезающих фильтров; 6 – двойной субтрактивный монохроматор; 7 – кварцевый светоделитель; 8 – кварцевая линза; 9 – приёмник-монитор обратной связи; 10 – температурный контроллер приёмника-монитора; 11 – трансимпедансный усилитель; 12 – блок суперконтинуум-лазера; 13 – цифровой вольтметр; 14 – заслонка; 15 – блок оптики в термостатированном корпусе; 16 – входное окно вакуумной камеры; 17 – вакуумная камера; 18 – абсолютный криогенный радиометр; 19 – вакуумная камера для исследуемых приёмников излучения; 20 – исследуемый приёмник излучения; 21 – калиброванный трансимпедансный усилитель; 22 – прецизионный цифровой вольтметр

Fig. 1. Functional scheme of facility for detector spectral responsivity measurements in the range from 0.9 to 1.6 μm :

1 – supercontinuum laser emitter; 2 – laser mirror expander; 3 – focusing unit; 4 – spectral lamp; 5 – cut-off filter wheel; 6 – double subtractive monochromator; 7 – quartz beamsplitter; 8 – quartz lens; 9 – feedback monitor detector; 10 – temperature controller for monitor detector; 11 – transimpedance amplifier; 12 – supercontinuum laser unit; 13 – digital voltmeter; 14 – shutter; 15 – mirror unit in thermostabilized shield; 16 – vacuum chamber entrance window; 17 – vacuum chamber; 18 – absolute cryogenic radiometer; 19 – vacuum chamber for detectors under test; 20 – detector under test; 21 – calibrated transimpedance amplifier; 22 – precise digital voltmeter

спектральном диапазоне 0,9–1,6 мкм используются отражательные дифракционные решётки 600 штр./мм с максимальной спектральной эффективностью на длине волны 1,6 мкм. Такие дифракционные решётки в составе двойного монохроматора обеспечивают спектральную ширину 4 нм в диапазоне 0,9–1,6 мкм при обратной линейной дисперсии 4 нм/мм. Градуировка шкалы длины волны монохроматора выполнена методом наблюдения кратных порядков излучения линий спектральной ртутной лампы ДРС-50 с точностью 0,2 нм [10].

Суперконтинуум-лазер имеет возможность стабилизации выходной средней мощности оптического излучения с использованием встроенной системы обратной связи [8]. Стабилизацию выходной мощности лазера можно обеспечить размещением светоделителя в лазерном пучке и отводом

части мощности на приёмник-монитор. При этом усиленный сигнал с выхода приёмника-монитора подаётся на вход цепи обратной связи лазера. Рабочий спектральный диапазон приёмника-монитора в этом случае не принципиален. Однако в силу особенностей работы суперконтинуум-лазера спектральное распределение мощности на его выходе непостоянно во времени и даже при стабилизации полной мощности сигнал на выходе монохроматора испытывает значительные флуктуации до 0,25 %.

По этой причине в представленной установке стабилизация интенсивности монохроматического излучения реализована следующим образом. После выходной щели монохроматора установлен тонкий кварцевый плоско-параллельный светоделитель 7 (см. рис. 1). Отражённая часть пучка падает на кварцевую линзу 8, которая фокусирует излучение на приёмной площадке приёмника-монитора обратной связи 9. Приёмником-монитором в диапазоне длин волн 0,9–1,6 мкм является одиночный фотодиод на основе арсенида индия-галлия InGaAs Hamamatsu G8605-25. Для снижения уровня шумов и повышения точности измерения сигнала приёмник-монитор термостабилизируется контроллером 10 при температуре –20 °С.

Приёмник-монитор подключается к трансимпедансному усилителю 11 с полосой пропускания 10 Гц. Здесь важно отметить, что стабилизируется именно средняя мощность источника, так как характерные времена усреднения при измерении АКР и исследуемыми приёмниками составляет единицы или десятки секунд. Изменяя коэффициент усиления, на выходе блока устанавливают значение постоянного напряжения в диапазоне +0,45...+4,5 В. Управляющее напряжение подаётся к блоку управления 12 суперконтинуум-лазера, который имеет встроенную стабилизацию мощности, основанную на использовании PID-регулятора. Мониторинг управляющего напряжения обратной связи производится с использованием цифрового мультиметра 13.

За кварцевым светоделителем в проходящем луче установлена управляемая заслонка 14. Её положение в системе определено таким образом, чтобы не разрывая цепь обратной связи при изменении режима работы АКР во время измерений оптической мощности. Такая система стабилизации мощности монохроматического излучения может потребовать подстройки коэффициента усиления цепи обратной связи на различных устанавливаемых длинах волн.

При расширении спектрального диапазона установки требуется замена приёмников-мониторов на детекторы соответствующего спектрального диапазона. Оптические элементы системы обеспечивают работу в диапазоне длин волн 0,4–2,5 мкм при условии установки в монохроматоре дифракционной решётки для соответствующего поддиапазона.

Круглая выходная апертура двойного монохроматора с помощью двух внеосевых параболических

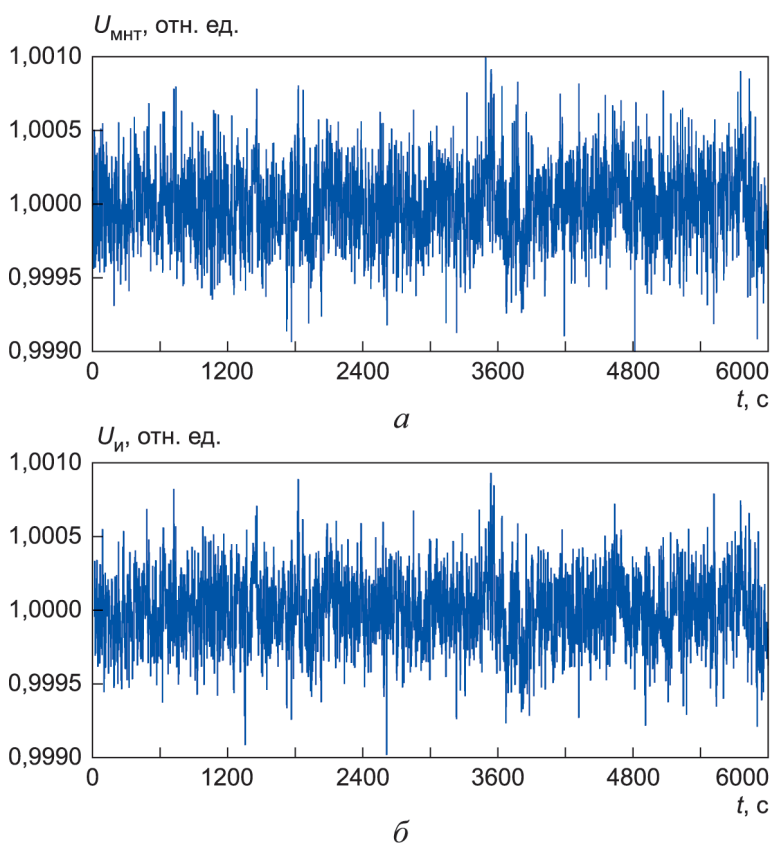


Рис. 2. Долговременная стабильность средней мощности монохроматического источника: относительный сигнал $U_{\text{мнт}}$ приёмника InGaAs G8605-25, используемого в качестве приёмника-монитора (а); относительный сигнал $U_{\text{и}}$ приёмника InGaAs G12180-050-SPL, установленного в вакуумной камере для исследуемых приёмников (б). За единицу принято среднее значение выходного сигнала соответствующего приёмника на промежутке 6000 с

Fig. 2. Long-term monochromatic source average power stability: (a) relative signal of InGaAs G8605-25 feedback detector, (b) relative signal of InGaAs G12180-050-SPL detector installed in a vacuum chamber for detectors under test. The one is the average value of the output signal of the corresponding detector for an time interval of 6000 seconds

зеркал проецируется на входную апертуру АКР 18 или площадку исследуемого приёмника 20 излучения, установленного в вакуумной камере 19 в зависимости от того, как в соответствии с программой измерений установлена подвижная платформа. Диаметр изображения выходной апертуры в плоскости приёмников излучения составляет 2,2 мм.

Так как процедура калибровки с использованием АКР сравнительно медленная, то в практических целях на описанной установке требуется калибровать по абсолютной спектральной чувствительности только эталонный приёмник излучения 20. С использованием этого детектора станет возможным калибровка других приёмников излучения по спектральной чувствительности. Эталонный приёмник должен иметь стабильную (в течение нескольких лет) чувствительность и быть пространственно-однородным, чтобы чувствительность не зависела от точки на поверхности, в которую попадает излучение. Желательно, чтобы эталонный приёмник функционировал при комнатной температуре и допускал использование как на воздухе, так и в вакууме. В разработанной установке в диапазоне длин волн 0,9–1,6 мкм используется специальный одноэлементный фотодиод на основе арсенида индия-галлия Hamamatsu G12180-050-SPL без входного окна, пригодный для работы в условиях высокого вакуума. Диаметр приёмной площадки детектора составляет 5 мм. К исследуемому приёмнику излучения подключается калиброванный малошумящий трансимпедансный усилитель 21, напряжение на выходе которого измеряется прецизионным цифровым вольтметром 22.

Исследование монохроматического источника на основе суперконтинуум-лазера. Длительность цикла измерений спектральной чувствительности с использованием АКР на представленной установке составляет 10 мин. При этом время усреднения одиночного измерения сигнала исследуемого приёмника излучения составляет 1 с. Так как изменение мощности источника во время цикла измерений является составляющей неопределённости измерения спектральной чувствительности, то была исследована долговременная стабильность поддержания средней мощности излучения монохроматического источника. Для этого с периодом 1,6 с и временем усреднения 0,5 с одновременно регистрировались показания вольтметра 13, подключённого к приёмнику-монитору системы обратной связи, и вольтметра 22, подключённого к исследуемому приёмнику излучения, установленному в вакуумной камере приёмников излучения. На рис. 2 приведены относительные сигналы приёмников излучения на длине волны монохроматического источника 1,0 мкм в течение 6000 с. Среднее значение выходной мощности на выходе монохроматора остаётся постоянным на указанном промежутке времени, при этом среднее квадратическое отклонение сигналов приёмников от среднего значения не превышает 0,025 %. Это на порядок лучше, чем в случае стабилизации полной мощности.

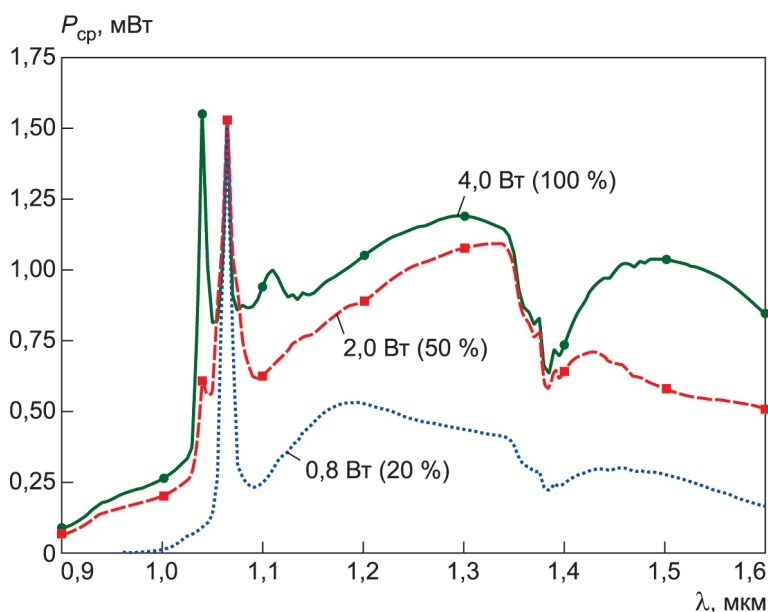


Рис. 3. Спектральное распределение средней мощности $P_{ср}$ излучения монохроматического источника в диапазоне длин волн 0,9–1,6 мкм

Fig.3. Monochromatic source average spectral radiant power in the range from 0.9 to 1.6 μm

Результаты измерений спектрального распределения средней мощности излучения, мВт, монохроматического источника в спектральной полосе 4 нм

Длина волны, мкм	Полная мощность излучения лазера	
	4 Вт	2 Вт
0,900	0,09	0,07
1,000	0,26	0,20
1,040	1,56	0,61
1,065	1,54	1,54
1,100	0,94	0,63
1,200	1,05	0,89
1,300	1,19	1,08
1,400	0,73	0,64
1,500	1,04	0,58
1,600	0,84	0,51

Спектральное распределение средней мощности излучения монохроматического источника со спектральной шириной 4 нм на основе суперконтинуум-лазера приведено на рис. 3 для полной мощности лазера 4 Вт (100 %) и 2 Вт (50 %). Следует отметить, что если полная мощность суперконтинуум-лазера будет меньше 0,8 Вт (20 %), то непрерывный спектр не формируется, а излучение сосредоточено в узкой спектральной полосе вблизи 1,065 мкм. Спектральное распределение средней мощности было измерено с использованием приёмника излучения

InGaAs, ранее калиброванного по АКР в диапазоне 0,9–1,6 мкм и установленного в вакуумной камере. В таблице приведены результаты измерений средней мощности излучения в точках, отмеченных на графике. Отличие от типового спектрального распределения объясняется ощутимым изменением спектрального распределения при изменении средней мощности суперконтинуум-лазера, а также спектральными зависимостями коэффициентов отражения и пропускания элементов оптического тракта (см. рис. 1).

Заключение. Разработанный монохроматический источник излучения, используемый в составе оптической установки на основе абсолютного криогенного радиометра, позволяет измерять спектральную чувствительность приёмников излучения в диапазоне 0,9–1,6 мкм с наивысшей в России точностью. Также данная установка обеспечивает измерение спектральной чувствительности при использовании ранее откалиброванного по АКР эталонного полупроводникового приёмника. Описанный метод стабилизации средней мощности монохроматического источника на основе суперконтинуум-лазера, позволил достичь стабильности по среднему квадратичному отклонению на уровне 0,025 %.

Поскольку используемый суперконтинуум-лазер является непрерывным в спектральном диапазоне 0,4–2,5 мкм, то имеется возможность дальнейшего расширения спектрального диапазона монохроматического источника.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники (ckp.vniiofi.ru), созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ» при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 05.595.21.0005 (уникальный идентификатор RFMEFI59519X0005).

Список литературы

1. Sapritsky V. I., Krutikov V. N., Ivanov V. S., et al, *Metrologia*, 2012, vol. 49, S9–S16. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/2/S9>
2. Metzdorf J., Winter S., and Wittchen T., *Metrologia*, 2000, vol. 37, pp. 573–578. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/37/5/52>
3. Глазов А. И., Григорьев В. В., Иванов В. С., Кравцов В. Е., Митюреев А. К., Тихомиров С. В., Крутиков В. Н. Эталонная база ВНИИОФИ в области волоконно-оптических систем передачи информации // Фотон-экспресс. 2015. № 8(128). С. 18–21.
4. Morozova S. P., Konovodchenko V. A., Sapritsky V. I., Lisiansky B. E., Morozov P. A., Melenevsky U. A., and Petic A. G., *Metrologia*, 1995/96, vol. 32, S557–S560. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/32/6/31>
5. Nan Xu, Yandong Lin, Haiyong Gan, Jianwei Li, *Proc. SPIE 10155, Optical Measurement Technology and Instrumentation*, 1015513 (19 October 2016). <https://doi.org/10.1117/12.2245666>

6. Gamouras A., Todd A. D. W., Côté É., and Rowell N. L., *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 972, (2018), 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/972/1/012014>
7. Woodward J. T., Smith A. W., Jenkins C. A., Chungsan Lin, Brown S. W., and Lykke K. R., *Metrologia*, 2009, vol. 46, S277–S282. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/4/S27>
8. Levick A. P., Greenwell C. L., Ireland J., Woolliams E. R., Goodman T. M., Bialek A., and Fox N. P., *Applied Optics*, 2014, vol. 53, no. 16, pp. 3508–3519. <https://doi.org/10.1364/AO.53.003508>
9. Гаврилов В. Р., Дунаев А. Ю., Лисянский Б. Е., Морозова С. П., Отряскин Д. А., Саприцкий В. И., Хлевной Б. Б. Государственный первичный эталон единиц величин абсолютной и относительной спектральных чувствительностей в диапазоне длин волн от 0,25 до 14,00 мкм ГЭТ 213-2014 // Измерительная техника. 2015. № 11. С. 15–18.
10. Earle K. Plyler, Lamdin R. Blaine, and Eugene D. Tidwell, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1955, vol. 5, no. 5, pp. 279–284. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.055.032>

References

1. Sapritsky V. I., Krutikov V. N., Ivanov V. S., et al, *Metrologia*, 2012, vol. 49, S9–S16. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/2/S9>
2. Metzdorf J., Winter S., and Wittchen T., *Metrologia*, 2000, vol. 37, pp. 573–578. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/37/5/52>
3. Glasov A. I., Grigorev V. V., Ivanov V. S., Kravtsov V. E., Mityurev A. K., Tikhomirov S. V., Krutikov V. N., *Photon-Express*, 2015, no.8 (128), pp. 18–21 (in Russian).
4. Morozova S. P., Konovodchenko V. A., Sapritsky V. I., Lisiansky B. E., Morozov P. A., Melenevsky U. A., and Petic A. G., *Metrologia*, 1995/96, vol. 32, S557–S560. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/32/6/31>
5. Nan Xu, Yandong Lin, Haiyong Gan, Jianwei Li, *Proc. SPIE 10155, Optical Measurement Technology and Instrumentation*, 1015513 (19 October 2016). <https://doi.org/10.1117/12.2245666>
6. Gamouras A., Todd A. D. W., Côté É., and Rowell N. L., *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 972, (2018), 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/972/1/012014>
7. Woodward J. T., Smith A. W., Jenkins C. A., Chungsan Lin, Brown S. W., and Lykke K. R., *Metrologia*, 2009, vol. 46, S277–S282. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/4/S27>
8. Levick A. P., Greenwell C. L., Ireland J., Woolliams E. R., Goodman T. M., Bialek A., and Fox N. P., *Applied Optics*, 2014, vol. 53, no. 16, pp. 3508–3519. <https://doi.org/10.1364/AO.53.003508>
9. Gavrilov V. R., Dunaev A. Y., Lisyanskiy B. E. et al., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 58, pp. 1200–1204. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0869-5>
10. Earle K. Plyler, Lamdin R. Blaine, and Eugene D. Tidwell, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1955, vol. 5, no. 5, pp. 279–284. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.055.032>

Дата поступления: 29.07.2020.

Дата принятия: 29.08.2020.

Supercontinuum laser-based monochromatic radiant source for detector spectral responsivity characterization in the range 0.9–1.6 μm using absolute cryogenic radiometer

Aleksandr Yu. Dunaev, Andrey S. Baturin, Vladimir N. Krutikov, Svetlana P. Morozova

All-Russia Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russian Federation,
e-mail: dunaev@vniiofi.ru, baturin@vniiofi.ru, krutikov@vniiofi.ru, morozova-m4@vniiofi.ru

An improved monochromatic radiant source with spectral bandwidth of 4 nm based on supercontinuum laser and a double monochromator was included in absolute cryogenic radiometer-based facility to improve the accuracy of spectral responsivity measurement in the range 0.9–1.6 μm . The developed feedback system ensures stabilization of monochromatic radiant power with standard deviation up to 0.025 %. Radiant power that proceeds detector under test or absolute cryogenic radiometer varies from 0.1 to 1.5 mW in dependence of wavelength. The spectral power distribution of its monochromatic source for various operating mode is presented.

Key words: radiometry, photodetectors, spectral responsivity, absolute cryogenic radiometer, supercontinuum laser.