

Разработка приборов для измерения температуры объектов с неизвестной излучательной способностью



А. Н. Магунов,
д. ф.-м. н., профессор,
главный научный сотрудник,
НИИ Перспективных
материалов и технологий



Б. А. Лапшинов,
к. т. н., доцент, Национальный
исследовательский
университет
«Высшая школа экономики»
lbaniipmt@mail.ru



А. В. Суворин,
д. т. н., профессор,
главный научный сотрудник,
НИИ Перспективных
материалов и технологий
suv1945@mail.ru

В данной работе проведены экспериментальные измерения температур по спектрам теплового излучения объектов с неизвестной излучательной способностью в широком диапазоне температур (от 250 до 10000 К). Определены параметры спектрометров при измерении температур в диапазонах 1000–5000 К и 5000–10000 К.

Ключевые слова: спектральная пирометрия, излучательная способность, длина волны, дифракционная решетка, ПЗС-линейка.

Необходимость температурных измерений в подавляющем большинстве промышленных технологий давно признается специалистами [1, 2], но эти измерения во множестве случаев проводятся не точно не только в промышленном технологическом контроле, но и в научных исследованиях [3]. Причина заключается в принципиальных (неустраняемых) недостатках, имеющих в известных измерительных методах и проявляющихся либо в низких производительности и быстродействии, невозможности измерять высокие температуры (контактные методы), либо в низкой надежности результатов из-за существенных отличий реальных объектов от идеальных (бесконтактная оптическая пирометрия). Очевидным следствием низкого качества измерений является снижение процента выхода годной продукции и необходимость длительных и дорогостоящих эмпирических методов отладки технологических процессов.

В области современных высокотемпературных технологий (радиационных, лазерных, плазменных, микроволновых), где температура является критическим параметром большинства процессов, термометрия в настоящее время развита недостаточно. Кроме того, в мире ежегодно появляется большое количество новых материалов, о тепловом излучении которых нет никаких данных и температурные измерения при их использовании становятся практически неразрешимой задачей.

Перспективы термометрии неизученных объектов и процессов в новых технологиях связаны с необхо-

димостью разработки новых инновационных методов и средств измерений, не требующих знания оптических свойств объектов исследования и способных преодолеть ограниченные возможности традиционных методов, как контактных, так и бесконтактных.

Радиационная термометрия, основанная на регистрации теплового излучения нагретых объектов, позволяет измерять высокие температуры по оптическому излучению, используя свойства функции Планка, описывающей тепловой (температурный) спектр абсолютно черного тела.

Измерение температуры нагретых объектов методом спектральной пирометрии основано на регистрации сплошного спектра теплового излучения спектрометрами, поиске участков, где данный спектр подобен спектру излучения черного тела. При этом температура объекта определяется как параметр наблюдаемого распределения интенсивности излучения в определенном диапазоне длин волн, без привлечения данных о коэффициенте его излучения.

Спектральная интенсивность I Вт/(см² мкм) теплового излучения черного тела описывается формулой Планка:

$$I = (C_1 \lambda^{-5}) / (\exp(C_2/\lambda T) - 1),$$

где $C_1 = 37418$ Вт мкм⁴/см², $C_2 = 14388$ мкм К, λ — длина волны (в мкм).

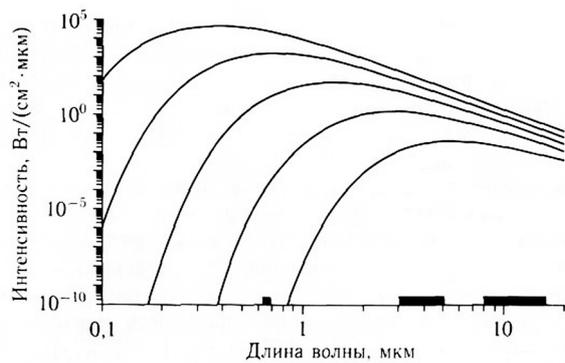


Рис. 1. Спектры теплового излучения черного тела при температурах 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 К (снизу вверх). На оси абсцисс отмечены спектральные интервалы, которые чаще всего используются для измерения температуры в оптической пирометрии

На рис. 1 показаны спектры теплового излучения черного тела при температурах от 500 до 8000 К. Максимум спектральной интенсивности находится на длине волны λ_{max} (мкм) = $2898/T$ (К) (это соотношение называется законом смещения Вина) [4]. При увеличении температуры до $\sim 10^4$ К максимум сдвигается в ближний ультрафиолетовый диапазон, при $\sim 10^5$ К максимум находится в рентгеновском диапазоне.

Диапазоны длин волн для спектрометра, специализированного для измерения температур в заданном интервале, оцениваются, исходя из необходимости получения сигнала (спектра) достаточно большой интенсивности в области, удаленной в сторону коротких волн от длины волны, соответствующей максимуму интенсивности в спектре теплового излучения Планка. Для использования наиболее простой модели (серого излучателя) при измерении температуры объекта с неизвестной излучательной способностью требуется выполнить условие, чтобы длины волн при регистрации спектра лежали в области $\lambda \leq \lambda_{\text{max}}/3$, где λ_{max} определяется из закона смещения Вина: $\lambda_{\text{max}} \approx 2900/T$ (К). Соотношения между диапазоном измеряемых температур и регистрируемым спектральным диапазоном были оценены и опубликованы нами в работах [5, 6].

Поскольку спектры теплового излучения являются непрерывными, а условия регистрации спектров разнообразными, связь между диапазоном длин волн и диапазоном измеряемых температур не является жестко детерминированной. Тем не менее, совершенно определенной является необходимость перемещения в сторону длинных волн для измерения более низких температур и в сторону коротких волн для измерения все более высоких температур. Возможность перемещения в коротковолновую сторону ограничена тем, что в области длин волн $\lambda \leq 190$ нм воздушная атмосфера непрозрачна для излучения. Это означает, что в области очень высоких температур (вблизи и выше 10000 К) разработанное нами условие применимости модели серого излучателя не может выполняться при работе прибора в воздушной атмосфере из-за невозможности зарегистрировать спектр при длинах волн, меньших 190 нм.

В области очень высоких температур, когда возможность работы в области коротких волн отсутствует, необходима разработка дополнительных условий, позволяющих безошибочно определять температуру

по спектру излучения. Такими условиями могут быть, например, пренебрежимо малые отличия зарегистрированного спектра от формы планковской функции. Однако в этой области температур объекты практически всегда находятся в испаренном и ионизированном (плазменном) состоянии, поэтому результаты экспериментов с объектами, нагретыми до таких температур, нельзя считать достоверными (в частности, температуры около 10000 К, полученные нами по спектрам излучения эрозионной лазерной плазмы, не могут быть верифицированы, и точность результата является неопределенной). Эталонных объектов в области температур вблизи 10000 К в настоящее время нет ни в одной из метрологических лабораторий мира, и сравнивать полученный результат измерения температуры не с чем.

В настоящее время промышленно выпускаются спектральные пирометры на диапазоны температур 1000–5000 К и 5000–10000 К (например, Ocean Optics, Avantes и др.), которые собраны из одинаковых комплектующих. Каждый пирометр состоит из корпуса, входной оптической щели, коллиматора, дифракционной решетки, зеркального объектива, оптического фильтра высших порядков дифракции, кремниевой ПЗС-линейки, интерфейса USB. Излучение от исследуемого объекта доставляется в спектрометр по оптическому волокну. Пирометры отличаются друг от друга свойствами ПЗС-линеек, диапазон чувствительности которых включает ближнее УФ-излучение, видимое и ближнее ИК-излучение.

В ПЗС-спектрометре спектр излучения регистрируется одновременно на всех длинах волн из области чувствительности. Они позволяют за время 0,1–10 мс зарегистрировать излучение, т. е. накопить сигнал в большинстве пикселей и получить практически непрерывный спектр. Это позволяет в каждом эксперименте проверять подобие регистрируемого и планковского спектров и находить участки спектра, в которых подобие имеется.

Для пирометра, предназначенного для работы в области 1000–5000 К, регистрируется спектр в диапазоне длин волн 350–760 нм, тогда как пирометр для более высокотемпературной области настроен на интервал длин волн 200–420 нм. Настройка проводится при сборке пирометра, в дальнейшем перестройка прибора на другой диапазон становится невозможной. После этого с помощью эталонных источников линейчатого излучения проводится точная привязка пикселей ПЗС-линейки к длинам волн.

В табл. 1 и 2 показано, при регистрации каких диапазонов длин волн можно считать несущественными оптические особенности нагретых объектов, проявляющиеся в зависимости излучательной способности от длины волны $\epsilon(\lambda)$.

Из табл. 1 видно, что при температурах 1000 и 2000 К диапазон длин волн, регистрируемых прибором (350–760 нм), полностью или частично соответствует условию $\lambda < \lambda_{\text{max}}/3$. Это означает, что имеется возможность достаточно точно (с погрешностью $\sim 1\%$) измерять температуру разнообразных нагретых объектов с неизвестной излучательной способностью. При повышении температуры длины волн, удовлетворяющие

Таблица 1

Положение спектрального интервала, регистрируемого пирометром ($\Delta\lambda = 350\text{--}760$ нм) относительно длины волны λ_{\max} , соответствующей максимальной интенсивности излучения черного тела при разных температурах в диапазоне 1000–5000 К

T, K	λ_{\max} , нм	$\lambda < \lambda_{\max}$	$\lambda_{\max}/3$, нм	$\lambda < \lambda_{\max}/3$
1000	2900	350–760	967	350–760
2000	1450	350–760	483	350–483
3000	966	350–760	322	–
5000	580	350–580	193	–

условию $\lambda < \lambda_{\max}/3$, выходят за пределы спектрального диапазона, регистрируемого пирометром. При этом растет неопределенность измерения температуры селективно излучающих объектов, связанная с возможным влиянием зависимости $\epsilon(\lambda)$. При выполнении менее жесткого условия $\lambda < \lambda_{\max}/2$ неопределенность температурных измерений для объектов с селективной излучательной способностью не превышает 5%.

Для высокотемпературного пирометра (табл. 2) все длины волн, удовлетворяющие условию $\lambda < \lambda_{\max}/3$, лежат в области вакуумного ультрафиолета и находятся за пределами спектрального интервала, регистрируемого прибором. В этом случае выполнение менее жесткого условия $\lambda < \lambda_{\max}/2$ обеспечивает неопределенность измерений, не превышающую 10%, в диапазоне температур до 6000 К. При увеличении температуры селективно излучающих объектов до 10000 К неопределенность результатов измерений растет. Это соответствует данным ряда других методов, разработанных для измерения температуры низкотемпературной плазмы [7, 8]. Отсутствие эталонных объектов в области высоких температур приводит к невозможности тестирования моделей измерительного процесса, что и проявляется в значительной неопределенности результатов измерений.

Измерительная процедура спектральной пирометрии включает регистрацию спектра излучения спектрометром, обработку зафиксированного спектра соответствующим программным обеспечением и определение искомой температуры в выбранном спектральном диапазоне длин волн. При выборе спектрального диапазона используется участок с низкой

Таблица 2

Положение спектрального интервала, регистрируемого пирометром ($\Delta\lambda = 200\text{--}420$ нм) относительно длины волны λ_{\max} , соответствующей максимальной интенсивности излучения черного тела при разных температурах в диапазоне 5000–10000 К

T, K	λ_{\max} , нм	$\lambda < \lambda_{\max}$	$\lambda_{\max}/3$, нм	$\lambda < \lambda_{\max}/3$
5000	580	200–420	193	–
7000	414	200–414	138	–
10000	290	200–290	97	–

интенсивностью шумов, достаточно удаленный как от коротковолнового, так и от длинноволнового края чувствительности спектрометра.

На рис. 2 показан монитор программы «Спектральная пирометрия» при регистрации спектра теплового излучения нагретого монокристалла кремния в интервале длин волн 350–760 нм.

Для достижения более высоких температур проводился, нагрев лазером в импульсном режиме тонких пленок окиси железа на поверхности стекла.

На рис. 3 показан полученный спектр в интервале длин волн 200–420 нм, содержащий как непрерывную составляющую, так и линейчатую (видны линии атомарного железа, идентифицированные по базе данных NIST [9]). По непрерывной составляющей в интервале длин волн 280–410 нм определена температура плазменного факела, образованного при испарении пленки, она составляет (по результатам семи измерений) $T = 4180 \pm 140$ К. Интенсивность спектральных линий сравнительно невелика по сравнению с интенсивностью непрерывного спектра, поэтому при вычислении температуры удаление спектральных линий не проводилось (методы и алгоритмы такого удаления линий ранее нами разработаны [10], но в виде программ пока не реализованы).

Возможность измерения более высоких температур (до 10000 К) с помощью этого прибора обусловлена тем, что интенсивность сигнала может увеличиваться еще на два порядка до насыщения фотоприемника. Чтобы достичь температуры 10000 К с помощью лазерного испарения тонких пленок, необходимы более высокие мощности излучения.

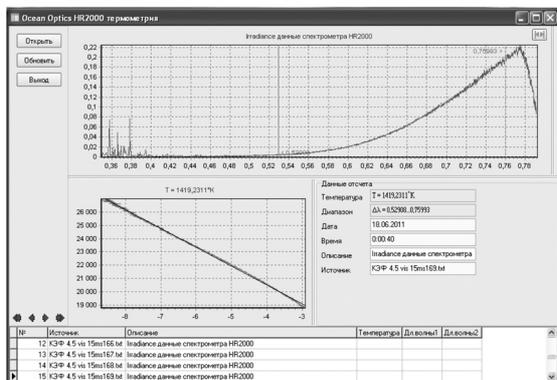


Рис. 2. Спектр теплового излучения монокристалла кремния, нагреваемого непрерывным лазерным излучением. Температура кристалла $T = 1419$ К

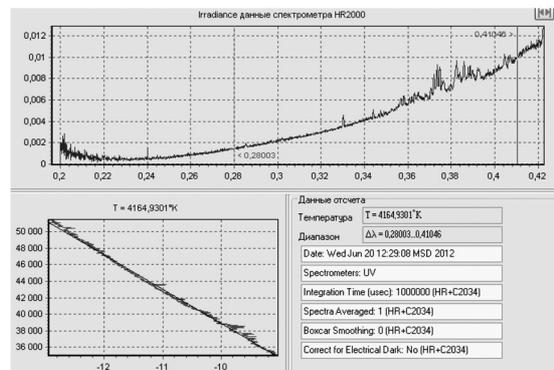


Рис. 3. Спектр излучения плазмы, образовавшейся при импульсном лазерном испарении тонкой пленки Fe_2O_3 . Температура $T = 4165$ К. Видны линии излучения атома FeI (15 сильных линий в интервале от $\lambda = 370$ до $\lambda = 390$ нм)

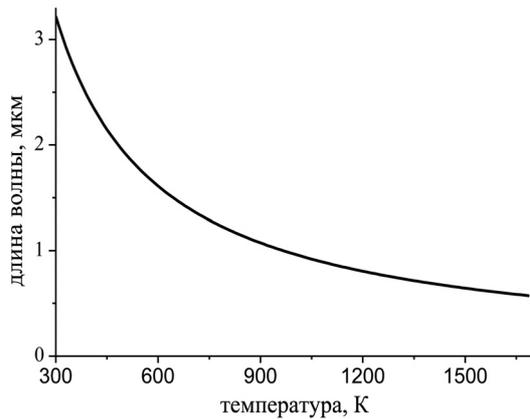


Рис. 4. Диапазон длин волн для регистрации спектра теплового излучения и вычисления температуры на основе модели серого излучателя лежит ниже кривой

Степень использования метода спектральной пирометрии в технологии и научных исследованиях зависит от достоверности полученных результатов измерений. В области температур 1000–5000 К имеется ряд опорных температур (точек плавления чистых веществ), по которым проводится тестирование прибора с целью оценки погрешностей измерения. Модели черного тела в метрологических лабораториях работают вплоть до температур 3500 К. Государственная система обеспечения единства измерений устанавливает требования к моделям абсолютно черных тел в диапазоне температур от –50 до +2500°C (ГОСТ Р 8.566-96) и к образцовым лампам в диапазоне температур 800–2300°C (ГОСТ 14008-82). Разработана поверочная схема для средств измерения в диапазоне температур от 960 до 3000°C (ГОСТ 8.558-2009).

Недостаточное развитие метрологического обеспечения в области более высоких температур (5000–10000 К), проявляющееся в отсутствии эталонных объектов с известными температурами, не дает возможности провести испытания высокотемпературного пирометра для оценки погрешностей измерения. Тестирование метода с помощью дополнительных методов термометрии в области высоких температур также проблематично.

Важным приложением нового измерительного метода и доводом в пользу его эффективности является получение результатов в тех условиях, где ранее измерения не проводились, и для тех объектов, которые традиционными методами не могли быть исследованы. Такие условия, существенно затрудняющие проведение измерений, возникают при наложении друг на друга спектров излучения разных источников — например, плазмы и поверхности (твердой или жидкой). Такими объектами, для которых измерения ранее не проводились, являются объекты с неизвестной излучательной способностью (смеси двух или нескольких веществ, неплоские поверхности со сложной геометрией, полупрозрачные диэлектрики, газовые пламена, наночастицы в эрозионной плазме и др.). Как показано нашими исследованиями, непрерывные спектры подобных объектов подобны спектрам серого излучателя, если регистрация проводится в коротковолновой области.

На рис. 4 приведена температурная зависимость длины волны λ , удовлетворяющей условию $\lambda = \lambda_{\max}/3$,

где λ_{\max} определяется из закона смещения Вина. Проводя измерения в области длин волн, лежащих ниже кривой, можно не принимать во внимание влияние селективности излучательной способности $\epsilon(\lambda)$, поскольку в этой области спектра любой объект является серым излучателем [4].

Выводы

Таким образом, в рамках работы созданы действующие макеты спектральных пирометров на разные диапазоны температур. Определены параметры спектрометров при измерении температур в диапазонах 1000–5000 К и 5000–10000 К. Приводится анализ использования нового метода измерения температуры объектов с неизвестной излучательной способностью — метода спектральной пирометрии. Приведены результаты экспериментов по измерению температур объектов в различных диапазонах температур. Показано, что при измерении температур до 6000 К неопределенность измерений не превышает 10%.

* * *

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список использованных источников

1. Ф. Линевер. Измерение температур в технике: справочник/Пер. с нем. Т. И. Киселевой, В. А. Федоровича. М.: Металлургия, 1980.
2. L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski, J. McGhee. Temperature Measurement. N.-Y.: John Wiley & Sons, 2001.
3. А. Н. Магунов. Теплообмен неравновесной плазмы с поверхностью. М.: Физматлит, 2005.
4. А. Н. Магунов. Выбор спектрального интервала, в котором нагретый непрозрачный объект излучает как серое тело//Приборы и техника эксперимента, № 6, 2010.
5. А. Н. Магунов, А. О. Захаров, Б. А. Лапшинов., Спектральная пирометрия с частотой регистрации спектров теплового излучения 200–330 Гц//Научное приборостроение. Т. 22. № 1. 2012.
6. А. Н. Магунов, А. О. Захаров, Б. А. Лапшинов. Измерение нестационарной температуры методом спектральной пирометрии// Приборы и техника эксперимента, № 1, 2012.
7. Plasma Diagnostics/W. Lochte-Holtgreven (Ed.). Amst.: North-Holland, 1968. (Методы исследования плазмы/Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. М.: Мир, 1971.)
8. K. Muraoka, M. Maeda. Laser-Aided Diagnostics of Plasmas and Gases. Bristol: IOP Publ., 2001.
9. NIST Atomic Spectra Database. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/index.html>.
10. А. Н. Магунов. Спектральная пирометрия. М.: Физматлит, 2012.

Development of instruments for measuring the temperature of objects with unknown emissivity

A. N. Magunov, Doctor of technical science, professor, Chief Scientific Officer, Institute for Advanced Materials and Technology, Moscow.

B. A. Lapshinov, PhD (technical), senior research, National Research University Higher School of Economics, Institute for Advanced Materials and Technology, Moscow.

A. V. Suvorinov, Doctor of technical science, professor, Chief Scientific Officer, Institute for Advanced Materials and Technology, Moscow.

In this work, experimental measurements of temperatures within the thermal radiation spectrum of objects with unknown radiating abilities in the wide range of temperatures (from 250 to 10000 K) are performed. The parameters of spectrometers are defined by measuring temperatures within the ranges of 1000–5000 K and 5000–10000 K.

Keywords: spectral pyrometry, radiating ability, wavelength, diffraction grating, charge-coupled-Devices.