

УДК 535.233.43, 535.338.1, 536.52

© А. Н. Магунов

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТОВ С НЕИЗВЕСТНОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПИРОМЕТРИИ

Обсуждается метод измерения температуры, основанный на регистрации спектра теплового излучения объекта с помощью спектрометра с ПЗС-линейкой фотоприемников. Проверяется подобие зарегистрированного спектра и спектра излучения черного тела. В случае, если спектры подобны, температура определяется как параметр наблюдаемого распределения без привлечения данных об излучательной способности объекта. Экспериментально зарегистрированы спектры излучения и определены температуры эрозионной плазмы микроволнового разряда на неоднородной твердой поверхности и алундовой трубки, нагретой в плазменном факеле.

Кл. сл.: измерение температуры, оптическая пирометрия, спектр теплового излучения

ВВЕДЕНИЕ

Спектральная пирометрия основана на измерении интенсивности оптического излучения нагретого объекта в широком интервале длин волн. Сравнивая полученный спектр с планковским спектром излучения черного тела, во многих случаях можно убедиться, что имеется подобие этих спектров. Это позволяет считать, что излучение объекта является равновесным, а его спектр с достаточной точностью соответствует спектру серого тела. Искомая температура объекта определяется как параметр наблюдаемого планковского распределения интенсивности. Данные об излучательной способности объекта не требуются. В этом существенное отличие от традиционных методов яркостной и цветовой пирометрии, где регистрируется не спектр, а интенсивность на одной или двух длинах волн.

Таким образом были определены температуры веществ, нагретых в алмазных наковальнях [1], ударных волнах [2] и плазменном факеле [3], микрочастиц в пламени [4] и наночастиц эрозионной лазерной плазмы [5], подложек в микротехнологии [6], газового пламени [7]. Измерительные характеристики, результаты и проблемы нового метода пирометрии обсуждались в обзоре [8].

В данной работе описаны устройство спектрального пирометра и процедура измерения температуры различных объектов с неизвестной излучательной способностью.

МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОЙ ПИРОМЕТРИИ

Спектр теплового излучения объекта с произвольной излучательной способностью $\varepsilon(\lambda, T)$ опи-

сывается выражением [9]

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

где $C_1 = 37418 \text{ Вт} \cdot \text{мкм}^4/\text{см}^2$, $C_2 = 14388 \text{ мкм} \cdot \text{град}$, длина волны в микрометрах, интенсивность в $\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{мкм})$.

Для области Вина, где $\exp(C_2/(\lambda T)) \gg 1$, после преобразования получаем

$$\ln(\varepsilon C_1) - C_2/(\lambda T) = \ln(\lambda^5 I). \quad (2)$$

Для серого тела ($\varepsilon = \text{const}$) это выражение является уравнением прямой в плоскости (x, y) , где $x = \ln(\lambda^5 I)$ и $y = C_2/\lambda$, при этом наклон прямой определяется температурой. Таким образом, построив полученный спектр в этих координатах, сразу находим температуру излучателя в случае, если зависимость спрямляется, т. е. объект является серым телом.

ПЗС-линейка регистрирует не интенсивность света ($I, \text{Вт}/\text{см}^2$), а полное число фотоэлектронов (N), соотношение между ними $I \sim N(h\nu)/\Delta t$ (где $h\nu$ — энергия кванта, h — постоянная Планка, Δt — время накопления, равное в данном случае 2 мс). Поскольку частота ν связана с длиной волны λ соотношением $\nu = c/\lambda$ (c — скорость света), выражение (2) принимает вид

$$\ln(\lambda^4 N) - \ln(\varepsilon C_1/(hc)) = -C_2/(\lambda T), \quad (3)$$

при этом спрямление планковского спектра происходит в координатах $x = \ln(\lambda^4 N)$ и $y = C_2/\lambda$.

Для определения температуры измеряется интенсивность излучения в достаточно большом числе точек спектра и строится зависимость (3). Если объект изотермичен, а спектры излучения черного тела и объекта подобны, зарегистрированный спектр представляет собой прямую линию.

К отклонениям от прямолинейности приводит обычно температурная неоднородность в области визирования [10]. К отклонениям также может приводить иногда зависимость $\varepsilon(\lambda)$.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ ПИРОМЕТР

Регистрация спектра излучения объекта проводится с помощью малогабаритного спектрометра (Ocean Optics или Avantes). В спектрометрах используются дифракционные решетки (от 300 до 1200 штрихов/мм) и кремниевые ПЗС-линейки фотоприемников, чувствительность которых лежит в диапазоне длин волн $\lambda \approx 200\text{--}1100$ нм. Спектральное разрешение составляет примерно 1 нм. Перестройка по длинам волн отсутствует. Время накопления спектра составляет 1–100 мс.

Излучение объекта падает на приемный торец оптического волокна и попадает в спектрометр, где происходит разложение в спектр и регистрация спектра с помощью 1024 или 2048 пикселей. После накопления и считывания спектра происходит его передача в компьютер и обработка.

Коррекция полученного первичного спектра состоит в умножении сигнала каждого пиксела на индивидуальный коэффициент, зависящий от

поглощения света данной длины волны в кремнии и квантового выхода фотоэффекта. Коэффициенты чувствительности определяют, регистрируя спектр излучения эталонной лампы при известной температуре вольфрамовой ленты.

Первый режим работы пирометра, называемый "стандартным", состоит в автоматизированной обработке заданного интервала спектра и выводе на монитор компьютера только цифровой информации (значения искомой температуры, статистических данных текущей серии измерений). Режим удобен для рутинных измерений температуры объектов, спектры которых заранее изучены.

В другом режиме, который называется "экспертным", на монитор для проведения анализа выводится весь регистрируемый спектр как в обычных координатах ($x =$ длина волны, $y = N$ — число отсчетов фотоэлектронов), так и в координатах Вина ($x = C_2/\lambda$, $y = \ln(\lambda^4 N)$), в которых спрямляется коротковолновый край функции Планка. Можно задать условия вычисления температуры, выбрав участки спектра, в которых отсутствуют сильные шумы, а также спектральные линии и полосы излучения. Возможно наложение спектров (для выявления отличий), сглаживание и усреднение. На рис. 1 показан спектр излучения на мониторе пирометра.

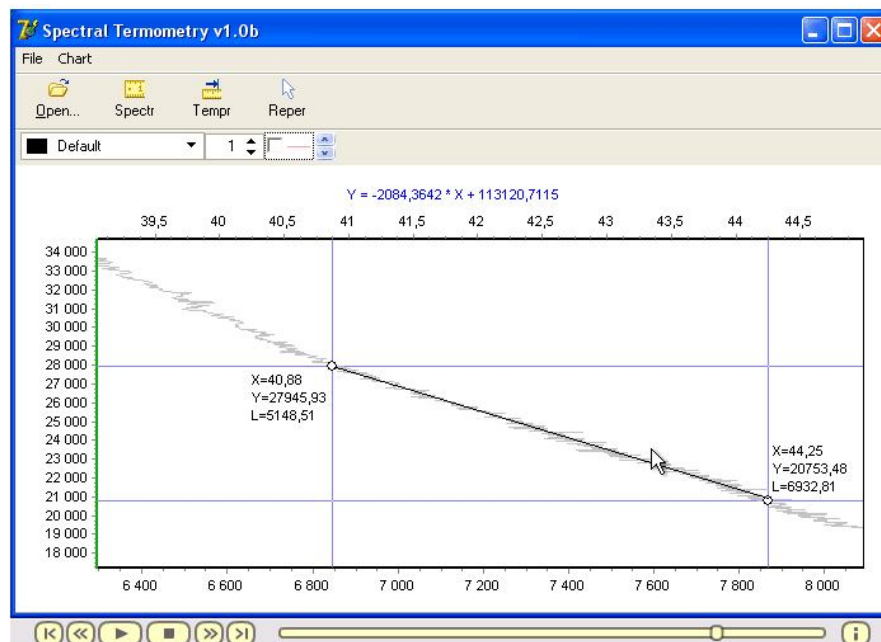


Рис. 1. Вид монитора с обработанным спектром при определении температуры. Искомое значение вычисляется по участку, заключенному между двумя кружками. Около каждого из кружков приведены координаты точки, в том числе длина волны (в ангстремах). Над графиком показано уравнение прямой, аппроксимирующей выбранный участок спектра. Температура $T = 2084$ К

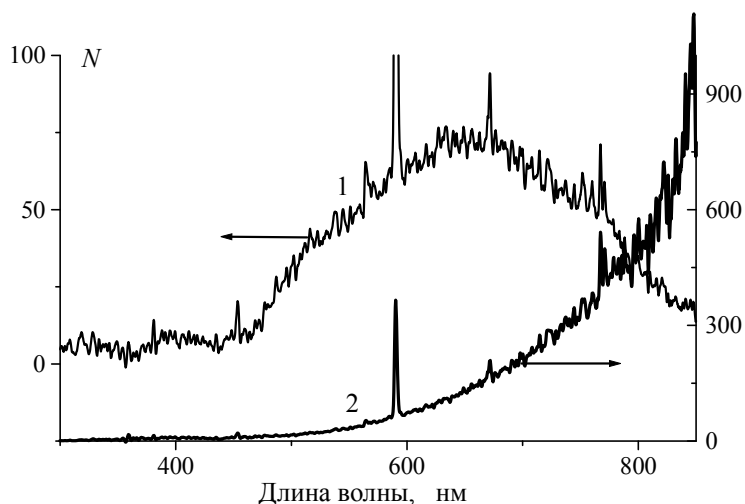


Рис. 2. Спектр излучения микроволнового разряда в порошковой смеси Sn-Al₂O₃ до (1) и после (2) коррекции

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим примеры применения метода. С помощью ПЗС-спектрометров проводили пирометрию микроволновых разрядов в порошковых смесях [11] и твердых тел в плазменном факеле микроволнового разряда в аргоне [3].

Схема установки с гиротронным комплексом (длина волны 4 мм, длительность импульса 1–8 мс, мощность в импульсе 50–200 кВт) подробно описана ранее [12]. Диаметр СВЧ-пучка на поверхности образца примерно 4 см. Образцы насыпной плотности готовились из порошков металла и диэлектрика. Размеры частиц составляли 5–20 мкм. Объемная доля металла в смеси составляет 10–50 %. Смесь помещали между двух кварцевых пластинок толщиной 1 мм и диаметром 8 см, толщина порошкового слоя 0.5 мм. Приемный торец оптического волокна спектрометра находился на расстоянии 30 см от образца. Регистрировалось излучение со всей поверхности разряда.

Установка для создания плазменного факела микроволнового разряда (длина волны 12.2 см) подробно описана ранее [3]. На расстоянии 0.5–1 см от сопла перпендикулярно потоку плазмы помещали трубку из алунда (керамика на основе корунда) диаметром 5 мм. Приемный торец оптического волокна находился на расстоянии 20 см сбоку от сопла.

На рис. 2 показан спектр микроволнового разряда в порошковой смеси олова (Sn) и окиси алюминия (корунд Al₂O₃). На рис. 3 участок этого спектра построен в координатах Вина. Выбран участок, удаленный как от коротковолнового, так и от длинноволнового краев чувствительности. Прямая, проведенная по экспериментальному спектру с помощью метода наименьших квадра-

тов, соответствует температуре $T = 2705$ К. При определении температуры участок спектра шириной примерно 1 нм вблизи $\lambda = 589$ нм (спектральная линия атома Na I, который является посторонней примесью) был удален. Среднеквадратичное отклонение от среднего (± 5 К) связано с разбросом экспериментальных точек относительно прямой. Соответствие экспериментального спектра и прямой характеризуется коэффициентом корреляции $r = 0.999$.

На рис. 4 показан участок спектра излучения алундовой трубки, нагретой в прозрачной аргонной плазме. Температура трубки $T = 2388 \pm 6$ К, коэффициент корреляции $r = 0.998$.

Спрямление экспериментальных данных в соответствующих координатах позволяет считать достоверными следующие утверждения: а) распределение интенсивности излучения соответствует закону Планка, т. е. излучение является тепловым; б) по сравнению с зависимостью $N(\lambda)$ зависимость $\varepsilon(\lambda)$ является слабой, и ее влияние на результат пренебрежимо мало. Таким образом, оба исследованных объекта излучают, как серое тело. Это свойство объектов заранее не постулировалось, но выявилось в результате сравнения экспериментальных спектров со спектрами черного тела. Коэффициенты излучения плазмы, поверхности частиц порошковой смеси и алундовой керамики неизвестны. При нахождении температуры спектральным методом коэффициент излучения не понадобился, достаточно найти наклон прямой.

Влияние спектральной зависимости $\varepsilon(\lambda)$ на результат вычисления температуры селективно излучающего объекта в рамках модели серого тела изучалось с помощью численного моделирования. Показано, что ее влияние несущественно, если спектр регистрируется в области длин волн, более

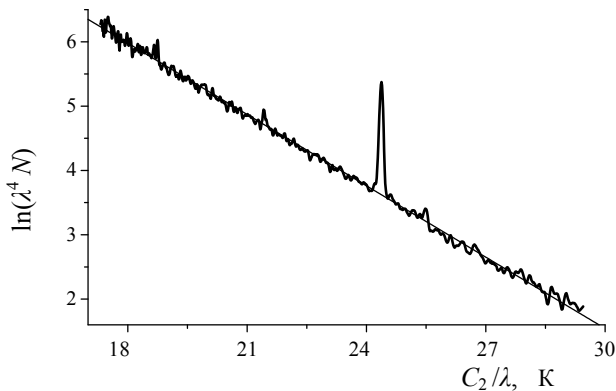


Рис. 3. Участок спектра ($\lambda = 488\text{--}830$ нм) в вивинских координатах. Температура $T = 2705 \pm 5$ К

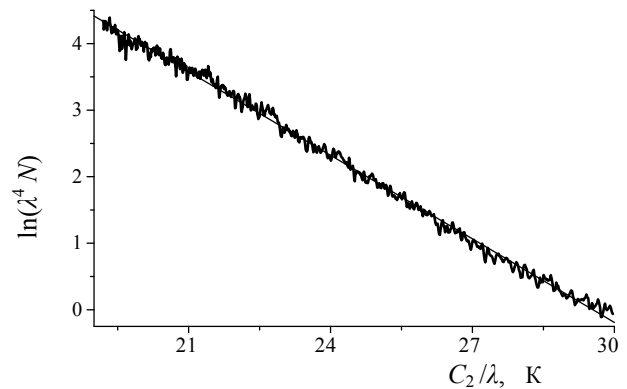


Рис. 4. Спектр излучения алундовой трубки в аргоновой плазме. Спектральный интервал 480–760 нм. Температура $T = 2388 \pm 6$ К

коротких чем $\lambda_{\max}/2$, где λ_{\max} соответствует максимуму распределения интенсивности при данной температуре. Это связано с тем, что зависимость интенсивности от длины волны намного сильнее, чем известные зависимости $\varepsilon(\lambda)$. Например, при $T = 2000$ К интенсивность излучения черного тела изменяется в интервале длин волн 200–400 нм более чем на 6 порядков, в интервале 400–700 нм более чем на 2 порядка, в интервале 700–1000 нм менее чем в 4 раза. Коэффициент излучения любого непрозрачного объекта в интервале 200–1000 нм изменяется не более чем в 2–5 раз. Поэтому в коротковолновой области теплового спектра практически любой непрозрачный объект излучает, как серое тело. Правильный выбор интервала длин волн позволяет уменьшить погрешность термометрии до 1 %.

В данной работе оба объекта в области визирования имеют пространственно-неоднородную температуру (горячие пятна в СВЧ-разряде и градиенты температур на поверхности алундовой трубки). Регистрируется спектр, образованный наложением спектров участков с разными температурами. Спектр спрямляется, т. е. для неоднородного объекта определяется единственное значение температуры. Показано [10, 13], что при больших перепадах температуры в области визирования вычисляемая по спектру температура на 5–10 % ниже максимальной температуры.

Для объективной оценки погрешностей необходимо проведение экспериментов с изотермическими объектами, для которых возможно применение не менее двух независимых методов термометрии. Такими объектами могут быть модели черного тела с известной температурой. Иногда в качестве объектов выбирают металлы (Pt, Fe, Si, W), при этом погрешности определения темпера-

тур плавления $T_{\text{пл}}$ составляют менее 1 % при усреднении результатов нескольких измерений [8].

Дополнительным преимуществом регистрации широкого спектра излучения является то, что при проведении традиционной пирометрии — яркостной (на одной длине волны) или цветовой (на двух длинах волн) — возможно перекрытие полосы фотоприемника со спектральными линиями излучающих атомов (например, с линией натрия на рис. 2), при этом неизбежны ошибки. В случае, когда визуально наблюдается спектр излучения объекта, участки со спектральными линиями или полосами легко исключить из дальнейшего анализа [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Малогабаритный спектрометр с ПЗС-линейкой применен в качестве спектрального пирометра, разработано программное обеспечение температурных измерений. Метод и прибор использованы для определения температуры объектов, для которых методы традиционной пирометрии неприменимы из-за отсутствия данных по излучательной способности.

Для развития спектральной пирометрии представляют существенное значение методы устранения или снижения шумов в спектрах. Это позволило бы увеличить в 1.5–2 раза спектральный диапазон, в котором проверяется прямолинейность спектра в координатах Вина.

Для определения погрешностей метода необходимы исследования с применением эталонных источников теплового излучения. Сравнить точность спектральной пирометрии с точностью яркостной и цветовой пирометрии можно с помощью тестов-

вых объектов для одновременного измерения температуры разными методами. Такими объектами могут быть катодное пятно вакуумной дуги, пламя и взрыв, металлы и полупроводники в точках плавления.

Применение спектральной пирометрии представляется перспективным для измерений в высокотемпературных технологиях, таких как выращивание кристаллов, быстрые термические процессы микротехнологии, синтез и обработка новых материалов в термических процессах (порошковая металлургия, производство керамик), воздействие на вещество мощных потоков излучений (лазерных, микроволновых, корпускулярных), горение топлива в авиационной и космической технике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boehler R.* Laser Heating in the Diamond Cell: Techniques and Applications // *Hyperfine Interactions*. 2000. V. 128. P. 307–321.
2. *Hare D.E., Holmes N.C., Webb D.J.* Shock-Wave-Induced Optical Emission from Sapphire in the Stress Range 12 to 45 GPa: Images and Spectra // *Phys. Rev. B*. 2002. V. 66, N 1. 014108.
3. *Бархударов Э.М., Грицинин С.И., Дрейден Г.В. и др.* Импульсно-периодический факел в коаксиальном волноводе // *Физика плазмы*. 2004. Т. 30, № 6. С. 575–585.
4. *Головко В.В., Полетаев Н.И., Флорко А.В.* Роль излучения в тепловом балансе ламинарного диффузионного факела железа // *Физика аэродисперсных систем*. Вып. 41. Одесса: Астропринт, 2004. С. 66–75.
5. *Amoruso S., Bruzzese R., Spinelli N., et al.* Emission of Nanoparticles During Ultrashort Laser Irradiation of Silicon Targets // *Europhys. Lett*. 2004. V. 67. P. 404–410.
6. *Baller T.S., Kools J.C.S., Dieleman J.* Surface Temperature Measurements Using Pyrometry During Excimer Laser Pulsed Etching of Silicon in a Cl₂ Environment // *Appl. Surf. Sci.* 1990. V. 46. P. 292–298.
7. *Obertacke R., Wintrich H., Wintrich F., Leipertz A.* A New Sensor System for Industrial Combustion Monitoring and Control Using UV Emission Spectroscopy and Tomography // *Comb. Sci. Technol.* 1996. V. 121, N 1-6. P. 133–151.
8. *Магунов А.Н.* Спектральная пирометрия // *Приборы и техника эксперимента*. 2009. № 4. С. 5–28.
9. *Рибо Г.* Оптическая пирометрия. М.-Л.: ГТТИ, 1934.
10. *Магунов А.Н.* Спектральная пирометрия объектов с неоднородной температурой // *ЖТФ*. 2010. Т. 89, № 7. С. 78–82.
11. *Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Копьев В.А. и др.* Термометрия СВЧ-разряда в порошковых смесях по спектру теплового излучения // *ТВТ*. 2008. Т. 46, № 1. С. 135–141.
12. *Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Копьев В.А. и др.* Микроволновый "ячеистый" разряд в мелкодисперсных порошковых смесях // *Физика плазмы*. 2002. Т. 28, № 10. С. 945–951.
13. *Rekhi S., Tempere J., Silvera I.F.* Temperature Determination for Nanosecond Pulsed Laser Heating // *Rev. Sci. Instrum.* 2003. V. 74, N 8. P. 3820–3825.

**НИИ перспективных материалов и технологий
МГИЭМ (ТУ), Москва**

Контакты: *Магунов Александр Николаевич*,
almag@mail.ru

Материал поступил в редакцию 12.05.2010.

TEMPERATURE MEASUREMENT OF OBJECTS WITH UNKNOWN EMISSIVITY USING A TECHNIQUE OF SPECTRAL PYROMETRY

A. N. Magunov

Research Institute of Advanced Materials and Technology of the Moscow Institute for Electronics and Mathematics (Technical University), Moscow

A technique of temperature measurement based on the recording of a thermal emission spectrum of the object under study using CCD-spectrometer is discussed. Similarity of recorded spectrum and black-body spectrum is examined. If these spectra are similar, the temperature is determined as a parameter of the observed distribution, without recourse to object's emissivity. Emission spectra have been registered experimentally and temperatures have been determined for erosion plasma of microwave discharge on inhomogeneous solid surface and alundum tube heated in a plasma torch.

Keywords: temperature measurement, optical pyrometry, thermal emission spectrum