

Мультиспектральная камера для динамических измерений распределения высоких температур на поверхности твёрдых тел

* К.М. БУЛАТОВ, П.В. ЗИНИН, А.С. МАЧИХИН, И.Б. КУТУЗА

Научно-технологический центр уникального приборостроения (НТЦ УП) РАН, Москва

* E-mail: kamil.bulatov@phystech.edu

Аннотация

Представлен новый метод быстрого измерения поверхностного распределения температуры на основе восьмицветной видеокамеры. Частота измерения – 80 Гц. Разработан математический аппарат для определения распределения температуры в поле зрения камеры без использования данных об излучательной способности. Статистическая ошибка измерений температуры при значении 1170 K составляет 10 %, а при значении 1500 K – 3 %. Показано, что метод мультиспектрального измерения работоспособен и позволяет получать поверхностные распределения температур объектов неизвестного состава.

Ключевые слова: динамическое измерение, распределение поверхностной температуры, мультиспектральная видеокамера, математический аппарат.

Введение

Динамическое измерение поверхностного распределения температуры (T) нагретых тел с неизвестным коэффициентом излучения ε востребовано во многих областях науки и техники, включая геофизику [1], синтез новых материалов, изучение фазовых переходов [2, 3] и т.д. На сегодняшний день для определения распределения T объектов с неизвестным ε применяются методы спектральной пирометрии, а именно: гиперспектральной и мультиспектральной пирометрии и спектрального отношения. Недавно было показано, что использование двойной акустооптической (АО) фильтрации (TAOF) в сочетании с монохромной видеокамерой позволяет проводить измерение распределения T путём регистрации спектров теплового излучения объекта во всех точках объекта и дальнейшего сравнения их с кривой Планка. К сожалению, этот метод не подходит для исследования быстрых тепловых процессов, таких как фазовые переходы, плавление и т.д., поскольку типичное время экспозиции камеры при измерении распределения T с использованием TAOF варьируется от 0,5 до 0,1 с. Соответственно, если за это время меняется распределение T , то измерения дают значительные ошибки в температурной карте, что препятствует измерению быстрых изменений распределения T . Пирометры спектрального отношения лишены этих недостатков, но они применимы, если спектр излучения измеряемого тела близок к спектру излучения чёрного тела, т.к. в этих приборах по двум измерениям проводится определение двух неизвестных величин, а именно ε и T . Поэтому измерения спектрального отношения с помощью пирометров сопряжены с большими погрешностями измерений.

Цель представляемой работы состояла в разработке нового метода быстрого измерения поверхностного распределения T на основе восьмицветной видеокамеры. В та-

кой камере в каждом пикселе содержится восемь спектральных каналов, что позволяет определять распределение T светящегося тела по восьми независимым измерениям кривой Планка.

Описание метода

Дистанционное измерение T основано на использовании закона Планка для нагретых тел [4], описывающего спектр электромагнитного излучения тела, нагретого до данной T :

$$I(\lambda, T) = \varepsilon(T) \cdot g(\lambda, T),$$
$$g(\lambda, T) = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right)^{-1}, \quad (1)$$

где $I(\lambda, T)$ – спектральная плотность энергетической яркости, λ – длина волны, T – температура, $C_1 = 3,7413 \times 10^{-16}$ Вт·м², $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$ м·К. В уравнении (1) ε не зависит от λ . Хотя тел, для которых это предположение выполняется, называемых «серыми», не существует, однако во многих участках спектра условие постоянства ε выполняется [5], и далее условие серости будет считаться выполненным.

Суть метода заключается в нахождении таких значений $T = T_0$ и $\varepsilon = \varepsilon_0$, при которых сумма квадратов отклонений N измеренных значений $I(\lambda_i)$ от соответствующих теоретических, определяемая как

$$S(\varepsilon, T) = \sum_1^N [I(\lambda_i) - \varepsilon \cdot g(\lambda_i, T)]^2,$$

была бы минимальной (двумерная нелинейная минимизация). В случае восьмицветной камеры излучение филь-

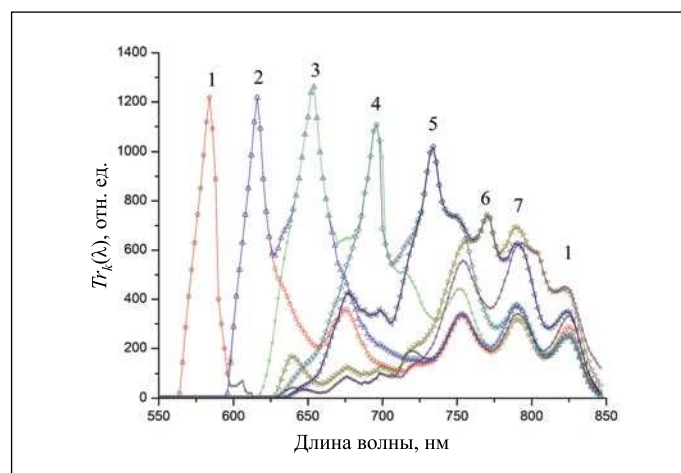
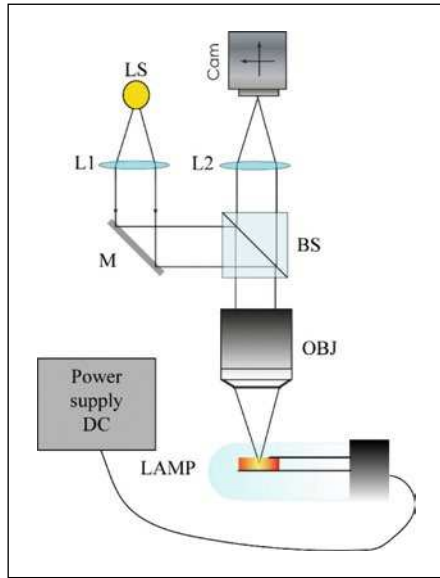


Рис. 1. Спектральная чувствительность восьми каналов мультиспектральной камеры фирмы Silios Technologies

Рис. 2. Принципиальная схема установки



труется в восьми каналах с известной спектральной зависимостью, описываемой спектральной функцией светочувствительности $T_k(\lambda)$, $k = 1, \dots, 8$ (рис. 1). Все каналы имеют один или несколько пиков на λ 584, 616, 654, 696, 733, 753, 770 и 825 нм (рис. 1), причём в длинноволновой области имеет место заметное наложение спектров.

С учётом спектральной независимости ε процесс измерения может описываться системой уравнений

$$\bar{G}(T) \equiv \varepsilon \cdot G_k(T) = \varepsilon \int_{390}^{800} g(\lambda, T) \cdot T_k(\lambda) d\lambda, \quad k = 1, \dots, 8.$$

Величина невязки (суммы квадратов отклонений)

$$S = \sum_{k=1}^8 [I_k - \varepsilon \cdot G_k(T)]^2, \quad (2)$$

где I_k – сигнал на k -ом спектральном канале мультиспектральной камеры, пропорциональный интенсивности излучения исследуемого нагретого объекта. Таким образом, определение T и ε сводится к поиску минимума функции S по двум параметрам: T и ε (двумерная минимизация).

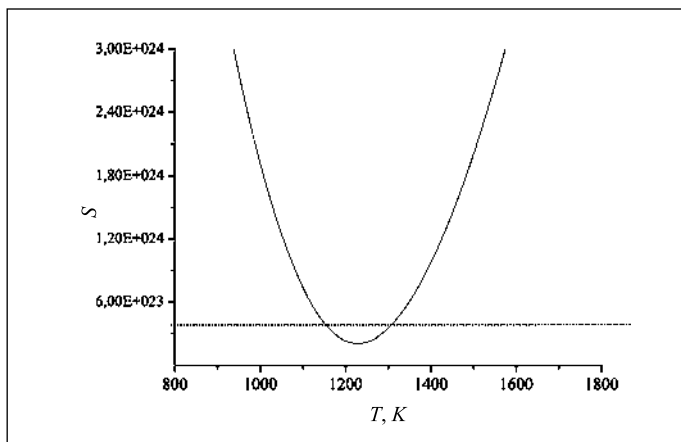


Рис. 4. Определение наиболее вероятного значения и погрешности определения температуры для одной из точек объекта (вольфрамовой ленты)

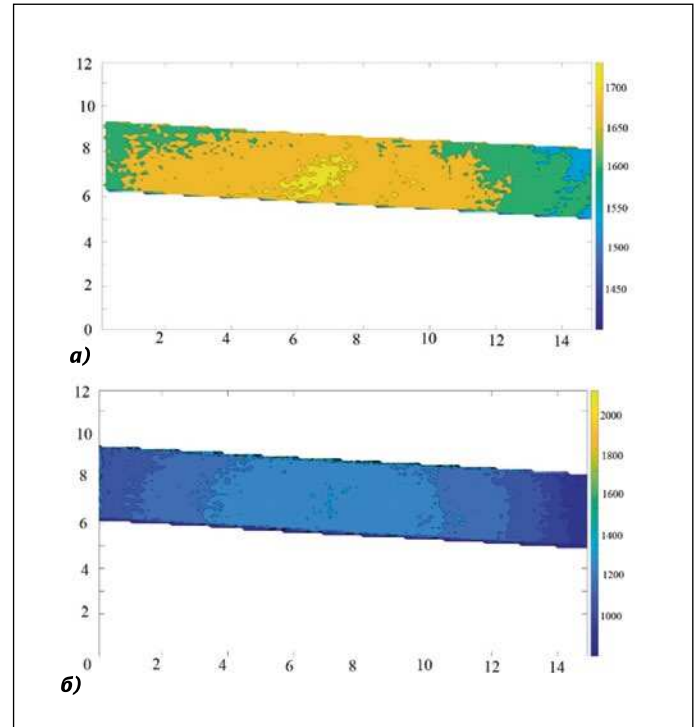


Рис. 3. Пространственное распределение температуры ленты лампы при токах нагрева 13,6 А, $T = 1573$ К (а) и 11,6 А, $T = 1283$ К (б). Время экспозиции камеры 100 мкс

Согласно работе [6], поиск минимума S может упрощать то, что ε входит линейно в уравнение (2). При этом при выбранном значении T минимум по S достигается при условии

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_0, T=T_0} = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) – необходимое условие минимума функции S . В силу линейной зависимости S от ε , несложно получить решение уравнения (3) в аналитической форме:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{k=1}^8 I_k(T) G_k(T)}{\sum_{k=1}^8 (G_k(T))^2}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (2), получим выражение суммы квадратов отклонений S , зависящее только от одного параметра – T :

$$S = \sum_{k=1}^8 \left(I_k(T) - G_k(T) \frac{\sum_{k=1}^8 I_k(T) G_k(T)}{(G_k(T))^2} \right)^2. \quad (5)$$

Таким образом, проблема определения температуры сводится к одномерному поиску минимума суммы квадратов отклонений S (уравнение (5)) по параметру T (одномерная минимизация).

Экспериментальная установка

Принципиальная схема установки приведена на рис. 2. В качестве образца для изучения точности метода используется светоизмерительная лампа СИ-6–100 с воль-

фрамовой ленточной нитью, нагреваемой электрическим током. Фокусировка системы и перемещение лампы осуществляются посредством моторизированного трёхкоординатного столика *XYZ (Standa 8MVT40-13)* с шагом 1,25 мкм. Изображение ленты строится микроскопической системой, которая состоит из микрообъектива *Obj Mitutoyo ×10 (OBJ)*, с большим рабочим отрезком, линзы L2 с фокусным расстоянием 400 мм и мультиспектральной камеры *Silios 8 color (Cam)*. Подсветка объекта осуществляется с помощью светоделителя (BS), источника белого света (LS) и коллимирующей линзы (L1) с фокусным расстоянием 40 мм (рис. 2). Данная система обеспечивает увеличение объекта примерно в 200 раз.

Результаты

Результаты вычисления распределения T ленты лампы при разных значениях тока, представленные на рис. 3, свидетельствуют о его неоднородности, возникающей из-за отвода тепла через крепления спирали на её краях. Поэтому при определении T рассматривалась лишь центральная часть ленты, имеющая наибольшую T .

Определение T по данным на 8-ми λ осуществлялось с использованием программы, написанной в среде «*Matlab*», и алгоритма, основанного на формуле (5). Используя критерий Фишера [7], доверительный интервал вычисляется по формуле $S(T) = S(T_0)[1+p/(n-p) \times F(n, p, \alpha)]$, где $F(n, p, \alpha)$ – параметр Фишера, α – доверительная вероятность, n – число измерений, p – количество параметров (в данных экспериментах $n = 8, p = 2$). При токе $I = 11,6$ А $T = 1283$ К, а доверительный интервал по уровню $0,95 \Delta T_{0,95} = \pm 64$ К (рис. 4).

Определённая зависимость температуры лампы от величины тока демонстрирует в целом монотонный рост. При этом величина погрешности падает с ростом температуры: с 10 % при $T = (1170 \pm 112)$ К до 3 % при $T = (1540 \pm 46)$ К. Одновременно T измерялась яркостным пирометром «Проминь М», обеспечивающим погрешность менее 1 % для тел с известным ϵ (рис. 5 и 6).

Обсуждение

Измерения показали хорошее соответствие значений T , полученных двумя методами (рис. 5). Снижение относительной ошибки измерений с ростом T выглядит необычно, поскольку теоретические оценки [8] предсказывают обратное поведение. Объяснение связано с тем, что спектральные кривые каналов (рис. 1) сильно перекрываются в длинноволновой области (> 650 нм), а потому точность определения спектральных данных по результатам измерений такой мультиспектральной камерой зависит от спектрального положения максимума планковского спектра. С ростом T спектр теплового излучения смещается в область коротких λ , где взаимное наложение спектральных каналов меньше.

Сравнение характеристик мультиспектрального метода на основе восьмичерной камеры и метода с использованием гиперспектральной 80-канальной системы на базе АО фильтров показало следующее. Погрешности обоих методов примерно одинаковы: 46 и 49 К соответственно. При этом частота получения данных видеокamerой в 40 раз превышает частоту АО системы – 2 Гц [9].

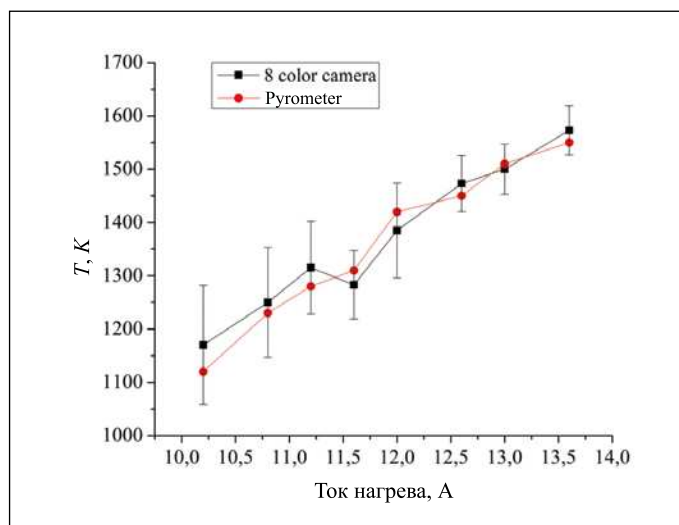


Рис. 5. Зависимость температуры центра объекта от тока нагрева при измерениях мультиспектральной камерой и пирометром. Приведены доверительные интервалы по уровню 0,95



Рис. 6. Изображение ленты лампы при токе нагрева 13,6 А, полученное пирометром. Температура нити (посередине) $T_p = 1550$ К

Высокоскоростная цветная видеокamera уже использовалась в методе бесконтактной двуцветной пирометрии для измерения быстрых изменений T поверхности топливных гранул [10], и было достигнуто разрешение по времени 2 мс. Однако этот метод применим только при известном значении ϵ образца.

Заключение

Исследованный новый метод измерения поверхностного распределения T на основе восьмичерной видеокamerы позволяет получать данные с частотой до 80 Гц. Погрешность измерений T составляет 3–10 %, что подтверждено измерениями яркостным пирометром. Обработка данных проводится с помощью разработанного математического аппарата, реализованного программно, после завершения регистрации всего временного ряда. Высокая скорость получения распределения T нагретых тел при сравнительно невысокой погрешности измерений T делают предложенный метод перспективным для исследования быстропротекающих процессов, происходящих в процессе нагревания твёрдых тел лазерами, таких как плавление и фазовые переходы [1, 11].

Благодарности

Исследование было поддержано Минобрнауки РФ (FFNS-2022-0008). Экспериментальная часть его выполнена с использованием оборудования уникальной научной установки «Лазерный нагрев в ячейках высокого давления» НТЦ УП РАН [http://ckp-rf.ru/ usu/507563].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bulatov K.M., Semenov A.N., Bykov A.A., Machikhin A.S., Litasov K.D., Zinin P.V., Rashchenko S.V. Measurement of thermal conductivity in laser-heated diamond anvil cell using radial temperature distribution // High Pressure Research. – 2020. – Vol. 40, No. 3. – P. 315–324.
2. Popov M. Yu., Churkin V.D., Kulnitskiy B., Kirichenko A.N., Bulatov K.M., Bykov A.A., Zinin P.V., Blank V. Transformation of diamond to fullerene-type onions at pressure 70 GPa and temperature 2400 K // Nanotechnology. – 2020. – Vol. 31(31). – Art.n. 315602.
3. Takemura K., Yusa H., Eremets M.I., Shekar N.V.C. Materials synthesis at high pressures in the laser-heated diamond-anvil cell // European Journal of Solid State and Inorganic Chemistry. – 1997. – Vol. 34, No. 7–8. – P. 657–668.
4. Magunov A.N. Spectral pyrometry (Review) // Instruments and Experimental Techniques. – 2009. – Vol. 52, No. 4. – P. 451–472.
5. Magunov A.N. The choice of a spectral interval within which a heated opaque object radiates as a gray body // Instruments and Experimental Techniques. – 2010. – Vol. 53, No. 6. – P. 910–914.
6. Bulatov K.M., Mantrova Y.V., Bykov A.A., Gaponov M.I., Zinin P.V., Machikhin A.S., Troyan I.A., Batshev V.I., I.B. Kutuza I.B. Multi-spectral image processing for the measurement of spatial temperature distribu-

- tion on the surface of the laser heated microscopic object // Computer Optics. – 2017. – Vol. 41, No. 6. – P. 864–868.
7. Draper N.R., Smith H. Applied Regression Analysis / 3 rd ed. – New York: John Wiley & Sons Inc, 1998. – 736 p.
8. Мантрова Ю.В., Зинин П.В., Булатов К.М., Быков А.А. Изменение распределения коэффициента излучения и температуры поверхности вольфрама, нагретого излучением мощного лазера // Оптический журнал. – 2020. – Т. 87, № 11. – С. 10–20.
9. Zinin P.V., Bykov A.A., Machikhin A.S., Troyan I.A., Bulatov K.M., Mantrova Y.V., Batshev V.I., Gaponov M.I., Kutuza I.B., Rashchenko S.V., Prakashenka V.B., Sharma S.K. Measurement of the temperature distribution on the surface of the laser heated specimen in a diamond anvil cell system by the tandem imaging acousto-optical filter // High Pressure Research. – 2019. – Vol. 39, No. 1. – P. 131–149.
10. Glushkov D.O., Egorov R.I., Klepikov D.M. High-speed contactless measurements of temperature evolution during ignition and combustion of coal-based fuel pellets // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol. 175. – Art.n. 121359.
11. Bulatov K.M., Zinin P.V., Bykov A.A. Determination of the Melting Point of Solids by the Imaging Acousto-Optical Filter // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2020. – Vol. 14, No. 5. – P. 1092–1096.



Булатов Камил Маратович, кандидат техн. наук. Окончил в 2016 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Младший научный сотрудник НТЦ УП РАН. Область научных интересов: физика высоких давлений, обработка спектральных данных, программирование и спектральный анализ



Мачихин Александр Сергеевич, доктор техн. наук. Окончил в 2007 г. факультет «Радиоэлектроника и лазерная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ведущий научный сотрудник НТЦ УП РАН. Область научных интересов: приборостроение, неразрушающий контроль, акустооптика, биомедицинская оптика



Зинин Павел Валентинович, кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 1980 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Ведущий научный сотрудник НТЦ УП РАН. Область научных интересов: физика высоких давлений, бриллиантовой и рамановской спектроскопии, лазерного ультразвука и синтеза углеродных материалов (гетероалмазов)



Кутуза Игорь Борисович, кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 1999 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Старший научный сотрудник НТЦ УП РАН. Область научных интересов: алмазы, сверхтвёрдые материалы, посткремниевая электроника, графитоподобные фазы, ИК спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния, акустооптика, физика высоких давлений

МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ И ВЫСТАВКИ В 2022 ГОДУ (IV квартал)

Дата	Название мероприятия	Место проведения
02–06.10	Light + Building 2022 Международная торгово-промышленная выставка с конференцией по осветительным технологиям и интеллектуальным зданиям (осеннее издание)	Франкфурт-на-Майне, ФРГ manufacturer.lighting
24.10–27.10.	Технофорум - 2022 Международная выставка «Оборудования и технологий обработки конструкционных материалов: металла, камня, дерева, органических, полимерных и композиционных материалов»	Москва, РФ exromar.ru
25–27.10.	Силовая Электроника - 2022 Международная выставка компонентов и модулей силовой электроники	Москва, РФ exromar.ru
25–29.10.	Hong Kong International Outdoor and Tech Light Expo Гонконгская международная светотехническая выставка (осеннее издание)	Гонконг, Специальный административный район КНР manufacturer.lighting
26–28.10	Taiwan International Lighting Show (TILS) Тайваньская международная светотехническая выставка	Тайбэй, Китайская республика (Тайвань) manufacturer.lighting
08–10.11	Belektro - Trade Show for Electrical Engineering, Electronics and Lighting Международная выставка электротехники, электроники и освещения	Берлин, ФРГ manufacturer.lighting
15–17.11	Smart City Expo World Congress (SCEWC) Ведущее международное мероприятие по умным городам	Барселона, Испания manufacturer.lighting