

УДК 535.233.43, 535.338.1, 536.52

© А. Н. Магунов, А. О. Захаров, Б. А. Лапшинов

СПЕКТРАЛЬНАЯ ПИРОМЕТРИЯ С ЧАСТОТОЙ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 200–330 Гц

Обсуждаются измерительные характеристики спектрального пирометра для регистрации последовательностей из сотен или тысяч спектров теплового излучения исследуемого объекта и определения зависимости $T(t)$ температуры от времени. Впервые проведена экспериментальная регистрация последовательности спектров теплового излучения. Время накопления спектров составляет 3–5 мс, частота регистрации спектров 200–330 Гц. Получена зависимость температуры микрочастиц титана и стальной пластинки от времени их нагревания лазерным излучением с длиной волны 1064 нм и мощностью 6–12 Вт.

Кл. сл.: измерение нестационарной температуры, оптическая пирометрия, спектры теплового излучения

ВВЕДЕНИЕ

Для изучения нестационарных процессов горения и взрыва, лазерного и плазменного нагревания материалов требуются методы и средства измерения температуры по тепловому излучению, нечувствительные к неопределенности данных по излучательной способности объекта. Проблема состоит в том, что излучательная способность не только неизвестна, но и изменяется во времени неизвестным образом (вследствие изменения температуры, химического состава, фазового состояния объекта, структуры поверхности).

Метод спектральной пирометрии [1] позволяет определять температуру объектов с неизвестной излучательной способностью, поскольку отсутствие данных об излучательной способности компенсируется обширной спектральной информацией. Метод применяется для термометрии нагретых объектов как в стационарных и квазистационарных условиях [2, 3], так и при импульсном воздействии [4, 5]. Однако в каждом эксперименте регистрируется лишь один спектр и вычисляется одно значение температуры.

Для определения нестационарной температуры $T(t)$ методом спектральной пирометрии необходимо с достаточно высокой частотой регистрировать последовательность спектров излучения и быстро обрабатывать их. В данной работе регистрация спектров излучения в диапазонах длин волн 530–760 нм и 760–980 нм при лазерном нагревании микрочастиц титана и стальной пластинки проведена с частотой 200–300 Гц, что позволяет наблюдать кинетику нагревания материала.

РЕГИСТРАЦИЯ И ОБРАБОТКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СПЕКТРОВ

Дифракционный ПЗС-спектрометр HR-2000+ (Ocean Optics) позволяет регистрировать спектры излучения с частотой от 0.05 Гц до 1 кГц, при этом время накопления одного спектра составляет от 20 с до 1 мс. Полное время регистрации последовательности спектров и их количество в одной последовательности задается в программе, управляющей работой спектрометра. Если нестационарный процесс нагревания-остывания объекта длится несколько секунд, последовательность содержит от нескольких сотен до нескольких тысяч спектров, каждый из которых содержит информацию о мгновенной температуре.

Для определения нестационарной температуры в процессах нагревания и остывания разработана программа автоматизированной обработки спектров. Массив файлов, в каждом из которых содержится один оцифрованный спектр излучения (зависимость интенсивности от длины волны), загружается в память программы. Затем каждый файл поочередно вызывается для обработки и вычисления температуры. На рис. 1 показано окно программы, в котором представлен обрабатываемый спектр (верхнее окно) и фрагмент того же спектра в координатах Вина (нижнее окно). В случае, когда спектр излучения объекта подобен спектру излучения черного тела, он спрямляется в координатах Вина, наклон определяет температуру. Интервал спектра (в данном случае от $\lambda = 530$ до 760 нм), по которому вычисляется температура, задается двумя маркерами (вертикальные

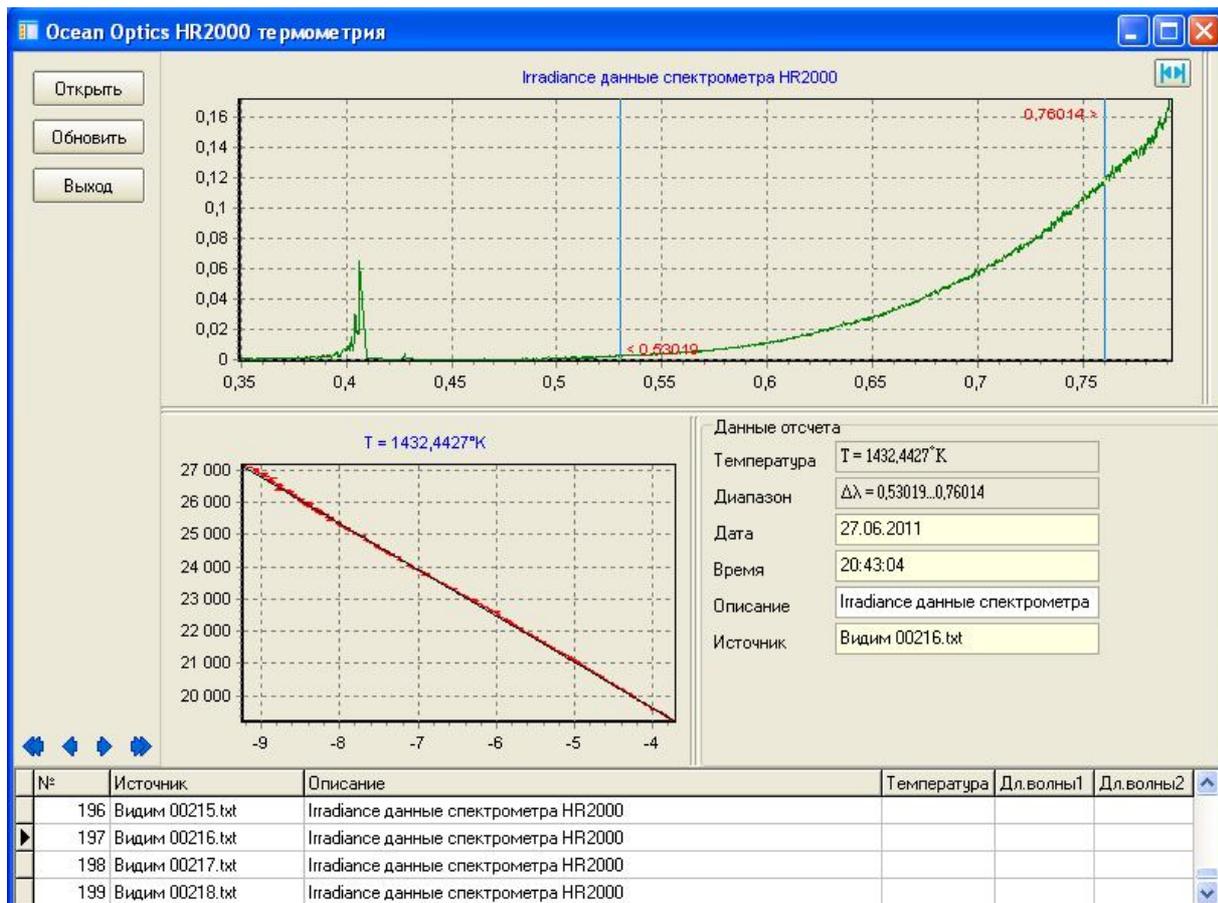


Рис. 1. Окно программы для обработки последовательности спектров теплового излучения и вычисления температур.

Маркерами (две вертикальные линии) из спектра выделен фрагмент ($\lambda = 530\text{--}760$ нм), по которому вычисляется температура. Результат вычисления ($T = 1432$ К) выводится над нижним окном и в верхней строке таблицы "Данные отчета"

линии). Как правило, отрезается участок коротковолнового края, где величина сигнала мала и преобладают шумы. В области длинноволнового края отрезаются длины волн, для которых не проводится калибровка. В данном случае калибровка для интервала длин волн 350–760 нм проводилась с помощью эталонной лампы LS-1-CAL с известным спектром излучения. Для второго спектрометра с диапазоном чувствительности от 650 до 1080 нм калибровка проводилась для интервала длин волн 650–1000 нм. При калибровке интенсивность спектра выражается в единицах мощности ($\text{мкВт}/(\text{см}^2\text{нм})$), поэтому для вычисления температуры регистрируемый спектр представляется в координатной плоскости (x, y), где $x = C_2/\lambda$, $y = \ln(\lambda^3 I)$. В тех случаях, когда калибровка спектрометра проводится не автоматически, а вручную, обычно используется координата $\ln(\lambda^4 N)$, где N — число отсчетов, пропорциональное количеству

фотоэлектронов в пикселе [6].

Последовательная обработка спектров позволяет построить зависимость температуры от времени. Регистрация нестационарной температуры $T(t)$, которая является решением нестационарного уравнения теплового баланса, позволяет построить температурную зависимость скорости нагревания и остывания образца, т. е. получить графическое изображение уравнения теплового баланса [7]. Зависимость между переменной (T) и ее производной по времени (dT/dt) аналогична фазовой траектории в плоскости "координата—импульс", широко применяемой в механике. Анализ фазовых траекторий позволяет разделить вклады разных тепловых источников (при их совместном действии) или разных тепловых стоков.

При увеличении температуры растет интенсивность сигнала, при этом потеря информации возможна либо из-за насыщения фотоприемника, ли-

бо из-за обрезания сигнала при оцифровке 14-разрядным амплитудно-цифровым преобразователем. Оценим, какой диапазон температур можно зарегистрировать в одной последовательности спектров при фиксированном времени накопления и при неизменной геометрии эксперимента. Отношение максимальной интенсивности излучения к минимальной (на одной и той же длине волны) не может превышать величины 1300, характеризующей динамический диапазон ПЗС-линейки. Задавая нижнюю температурную границу, с которой необходимо проводить определение температуры, можно найти верхнюю границу, при которой величина сигнала меньше уровня насыщения. На рис. 2 показаны зависимости максимальной температуры от длины волны при трех уровнях минимальной температуры (1000, 1200 и 1500 К). Видно, что при смещении вниз значения минимальной температуры уменьшается интервал температур, в котором можно проводить измерения. Причина в том, что интенсивность излучения в тепловом спектре (в области Вина) экспоненциально изменяется с температурой, поэтому в области низких температур (где показатель экспоненты велик) весь динамический диапазон фотоприемника оказывается задействованным при небольшом изменении температуры. В области более высоких температур зависимость интенсивности от температуры

менее резкая, поэтому здесь возможны измерения в более широком диапазоне температур.

Представляет интерес возможность продвижения в диапазон температур $T \leq 1000$ К, чтобы зарегистрировать кинетику нагрева, начиная от комнатной температуры. С помощью спектрометров с кремниевыми ПЗС-линейками невозможно измерять температуры, меньшие 1000–1100 К. Для регистрации зависимостей $T(t)$ во всем диапазоне температур $T \geq 300$ К необходимо одновременно применять по крайней мере два спектрометра, один из которых регистрирует спектры излучения в интервале длин волн 1–3 мкм, а второй в интервале 0.3–1 мкм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установка включает непрерывный многомодовый (Nd:YAG)-лазер (длина волны 1.064 мкм) мощностью до 30 Вт, измеритель мощности, держатель образца и два ПЗС-спектрометра с волоконно-оптическими входами для регистрации спектров теплового излучения нагретых образцов. Образцы: пластинка из углеродистой инструментальной стали У10А размером 2×2 мм и толщиной 0.26 мм и титановые микрочастицы в виде шариков диаметром 30–50 мкм.

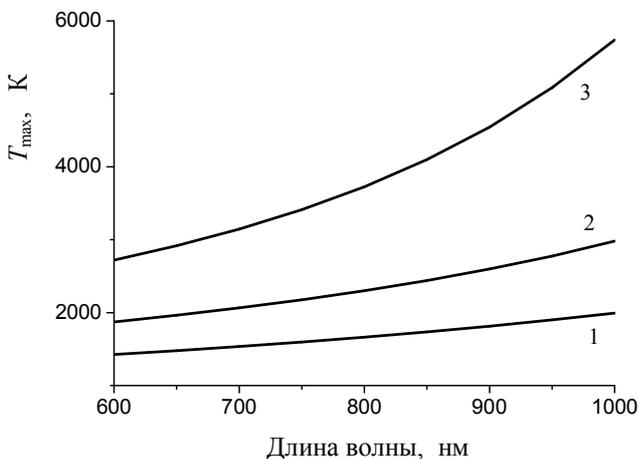


Рис. 2. Спектральная зависимость максимальной температуры, которую можно определить с помощью спектрометра с динамическим диапазоном 1300, не меняя условий эксперимента (т. е. при фиксированном времени накопления спектра и неизменной оптической схеме измерений). Минимальная температура (К): 1000 (1), 1200 (2), 1500 (3)

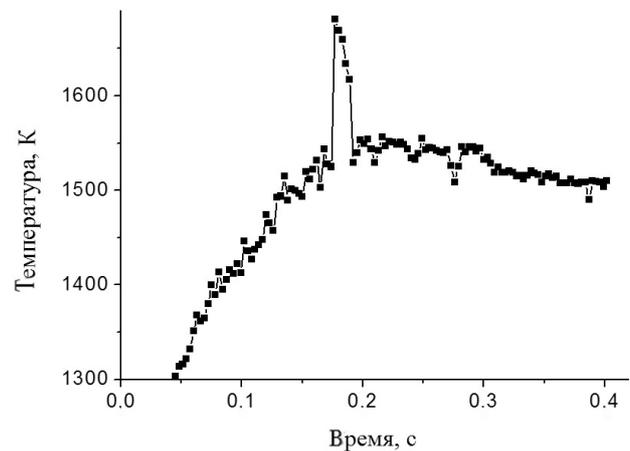


Рис. 3. Зависимость температуры стальной пластинки толщиной 0.26 мм от времени после начала облучения лазерным пучком (мощность 12 Вт)

Стальная пластинка размещалась на горизонтальной подложке (пластинке из поликора — тугоплавкой керамики на основе корунда, прозрачной для лазерного излучения). Диаметр лазерного пучка 3 мм, т. е. сверху по нормали облучается вся поверхность образца. Титановые шарики насыпались слоем толщиной примерно 0.5 мм на горизонтальную поликоровую подложку. Одновременно с началом облучения образца начиналась регистрация последовательности спектров. Для стальной пластинки время накопления спектра 3 мс и частота регистрации спектров 330 Гц, для титановых шариков время накопления 5 мс и частота регистрации 200 Гц.

На рис. 3 показана зависимость температуры стальной пластинки от времени после начала облучения при мощности лазерного пучка $P = 12$ Вт. Видно, что температура не достигает точки плавления стали У10А ($T_{\text{плав}} \approx 1730$ К). Резкое кратковременное увеличение температуры связано, вероятно, с горением одного или нескольких микроострий на поверхности стали (визуально это воспринимается как вспышка). Основной канал тепловых потерь пластинки, согласно оценкам, — теплоотвод в подложку через точки контакта и воздушный зазор между сталью и керамикой. Для определения интегральных тепловых потерь (мощности, отводимой в подложку, а также мощности радиационного теплоотвода) необходимо с высоким временным разрешением регистрировать кинетику охлаждения образца после выключения лазера. Эти исследования будут продолжены.

На рис. 4 показана эволюция температуры при облучении частиц Ti лазерным пучком диаметром 50 мкм и мощностью 6 Вт. В первую секунду об-

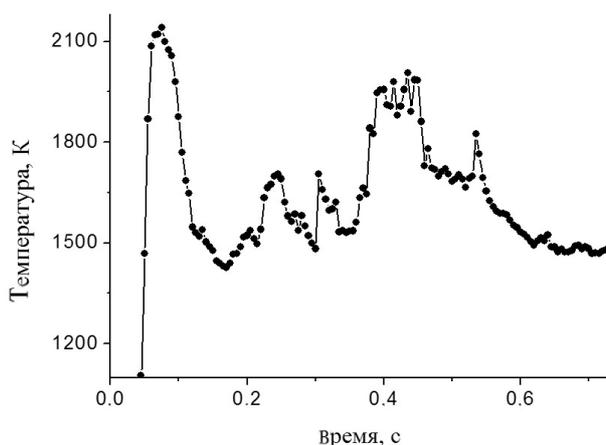


Рис. 4. Зависимость температуры слоя титановых шариков диаметром 50 мкм от времени после начала облучения лазерным пучком (мощность 6 Вт)

лучения достигнута и превышена температура плавления титана ($T_{\text{плав}} \approx 1940$ К). В дальнейшем происходит окисление (горение) титана на периферии лазерного пучка. Визуально горение наблюдается, как последовательность коротких ярких вспышек. В интервале $t = 0.38-0.45$ с происходят хаотические температурные флуктуации вблизи точки плавления. После окончания облучения область расплавления диаметром примерно 100–120 мкм наблюдалась в микроскоп. Вне области расплавления, в зоне диаметром 200–250 мкм поверхность титановых шариков оказалась покрытой белой матовой пленкой (вероятно, окисел титана). Поскольку температура в области визирования неоднородна, полученные значения являются усредненными, при этом значительный вклад в регистрируемый спектр в каждый момент дают частицы с максимальной температурой (аналог горячего пятна на поверхности [8]). Попытка зарегистрировать спектр теплового излучения при облучении одного шарика не удалась из-за низкой интенсивности свечения и малой светосилы спектрометра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Регистрация последовательности спектров теплового излучения позволяет определять зависимость температуры от времени после начала нагревания. В настоящее время выбор спектрального интервала для вычисления температуры проводится визуально, и интервал обозначается вручную двумя маркерами в окне программы. После установки маркеров на первом спектре происходит автоматизированное единообразное вычисление температуры для всех спектров последовательности. Для проведения полностью автоматизированной обработки спектров необходимо создать алгоритм, выполняющий ту же задачу (выбор интервала спектра) с помощью формальной процедуры. Эта задача в настоящее время не решена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия (обзор) // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 4. С. 5–28.
2. McCauley T.S., Israel A., Vohra Y.K. Spatially resolved in situ diagnostics for plasma-enhanced chemical vapor deposition film growth // Rev. Sci. Instrum. 1997. V. 68, N 4. P. 1860–1865.
3. Dianov E.M., Fortov V.E., Bufetov I.A., et al. High-speed photography, spectra, and temperature of optical discharge in silica-based fibers // IEEE Photonics Technology Letters. 2006. V. 18, N 6. P. 752–754.
4. Vazquez G., Camara C., Putterman S.J., Weniger K. Blackbody spectra for sonoluminescing hydrogen bubbles // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88, N 19. 197402.
5. Cramer L.P., Schubert B.E., Petite P.S., et al. Laser in-

- teraction with embedded Ca metal nanoparticles in single crystal CaF_2 // J. Appl. Phys. 2005. V. 97. 074307.
6. Копьев В.А., Косый И.А., Магунов А.Н., Тарасова Н.М. Термометрия по распределению интенсивности в спектре теплового излучения // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 4. С. 131–134.
 7. Карлов Н.В., Кириченко Н.А., Лукьянчук Б.С. Лазерная термохимия. М.: Наука, 1992. 147 с.
 8. Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Копьев В.А. и др. Спектральная пирометрия объектов с горячими пятнами // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 5. С. 757–762.

*НИИ перспективных материалов и технологий,
Москва*

Контакты: Магунов Александр Николаевич,
almag@mail.ru

Материал поступил в редакцию 1.07.2011.

SPECTRAL PYROMETRY WITH 200–330 Hz THERMAL SPECTRA RECORDING FREQUENCY

A. N. Magunov, A. O. Zakharov, B. A. Lapshinov

Research Institute of Advanced Materials and Technology, Moscow

Measurement characteristics of spectral pyrometer for recording of series containing hundreds or thousands of thermal spectra of object under study and for determination of temporal dependences of temperature $T(t)$ are discussed. Experimental registration of thermal spectra sequences was performed for the first time. Spectrum collection time equals to 3–5 ms, operation frequency is 200–330 Hz. Dependency of titanium particles temperature and steel plate on time of their laser heating at wavelength of 1064 nm and power of 6–12 W was shown.

Keywords: non-stationary temperature measurement, optical pyrometry, thermal emission spectra