

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 5. С. 95–107.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (5): 95–107.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 666.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-5-95-107

EDN: ZCDBOM

СПЕКТРАЛЬНАЯ ПИРОМЕТРИЯ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ НАГРЕВЕ, ПЛАВЛЕНИИ И ОХЛАЖДЕНИИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛОВ

Валентин Валерьевич Шеховцов

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Спектральная пирометрия при плазменном нагреве, плавлении и охлаждении неметаллических тугоплавких материалов имеет особую актуальность в нанотехнологиях, медицине, энергетике, металлургии и других областях, где требуется точный контроль температуры в процессе обработки различных материалов. Применение метода спектральной пирометрии направлено на создание новых технологий для измерения температуры в сложных условиях обработки и синтеза материалов, таких как плазменный нагрев, плавление и охлаждение неметаллических тугоплавких материалов. Результаты исследований в этой области могут улучшить процессы производства, снизить затраты на материалы и топливо, повысить эффективность работы установок и оборудования, а также качество и надежность конечной продукции.

Цель исследования: адаптация малогабаритных спектрометров в области спектральной пирометрии при диагностике конденсированных сред, подвергшихся нагреву и плавлению в среде термической плазмы.

В работе представлены результаты применения малогабаритных спектрометров в рамках диагностики нагрева, плавления и охлаждения кварцевой мишени посредством плазменной струи атмосферного давления. Диагностический комплекс для проведения экспериментальных исследований включает в себя два канала сбора данных: первый – микроспектрометр HPCS 300 со спектральным диапазоном 380–780 нм, который служит для определения цветовой температуры эталонного источника излучения и калибровки

оптоволоконного тракта; второй – микроспектрометр STS-VIS, в основе которого лежит ПЗС-детектор с 1024 элементами, спектральный диапазон – 350–800 нм, используется для снятия спектра излучения исследуемого объекта.

Выводы. Установлено, что при взаимодействии плазменной струи с кварцевой мишенью наблюдаются три этапа, включающих в себя деформацию поверхности, выход на стабильную температуру нагрева и охлаждение конденсированного материала с точками фазовых переходов «жидкое – пиропластичное – твердое».

Ключевые слова: спектральная пирометрия, плазма, нагрев, плавление, охлаждение, кварц

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0001 и гранта Президента МК-66.2022.4.

Для цитирования: Шеховцов В.В. Спектральная пирометрия при плазменном нагреве, плавлении и охлаждении неметаллических тугоплавких материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 5. С. 95–107. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-95-107. EDN: ZCDBOM

ORIGINAL ARTICLE

SPECTRAL PYROMETRY OF NON-METALLIC MATERIALS AT PLASMA HEATING, MELTING AND COOLING

Valentin V. Shekhovtsov

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Spectral pyrometry of non-metallic materials under plasma heating, melting and cooling is used in nanotechnology, medicine, energy, metallurgy and other industries, where accurate temperature control is required during processing various materials.

Purpose: The aim of this work is to create new spectral pyrometry technique for temperature measurement in difficult conditions of material processing and synthesis, such as plasma heating, melting and cooling of non-metallic materials.

Methodology/approach: Small-sized spectrometers for diagnostics of heating, melting and cooling of the quartz target using the plasma jet. HPCS300 Mini Spectrometer with the wavelength range of 380 to 780 nm is used to determine the color temperature of the reference radiation source and for fiber optic calibration. The STS-VIS Microspectrometer based on a 1024×1 element CCD photodetector array with the wavelength range of 350 to 800 nm is used to record the emission spectrum of the object.

Research findings: Improvement of production processes, fuel and material cost reduction, increase in the efficiency of plants and equipment, reliability and quality improvement of the final product.

Value: During the plasma jet and quartz target interaction, three stages are observed: surface deformation, stable temperature of heating, and cooling of the condensed material with phase-transition points of liquid–pyroplastic–solid states.

Keywords: spectral pyrometry, plasma, heating, melting, cooling, quartz

Funding: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FEMN-2022-0001) and Grant No. MK-66.2022.4 from the President of the Russian Federation.

For citation: Shekhovtsov V.V. Spectral pyrometry of non-metallic materials at plasma heating, melting and cooling. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitek-

turno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (5): 95–107. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-95-107. EDN: ZCDBOM

Введение

Метод спектральной пирометрии (СП) основан на измерении излучения тела в определенном диапазоне спектра и преобразовании его значения в термодинамическую температуру [1, 2, 3, 4]. Преобразование осуществляется с помощью математического анализа кривых излучения и сопоставления их с термодинамическими характеристиками материала. Одним из основных преимуществ метода СП является его бесконтактность, что позволяет измерять температуру образца без прямого соприкосновения с ним. Это свойство актуально при производстве керамических материалов, т. к. нагрев, плавление и кристаллизацию можно контролировать на расстоянии, исключая влияние погрешности при непосредственном измерении температуры [5, 6, 7]. Метод спектральной пирометрии обеспечивает высокую точность измерений температур, что актуально при производстве керамических материалов. Диагностика температурных границ определяет формирование заданных кристаллических структур и свойств материала.

К недостаткам метода СП можно отнести поглощение или отражение излучения при диагностике полупрозрачных керамических изделий [1, 4]. Это приводит к погрешности измерений и неверной оценке температуры. Кроме того, метод спектральной пирометрии может быть менее точным для материалов с изменяющимся спектральным коэффициентом, таких как керамика, которая меняет свою спектральную интенсивность с изменением температуры. Для более точного измерения может потребоваться калибровка оборудования.

Реальный объект обладает полным спектром теплового излучения, который описывается формулой Планка и коэффициентом излучения [1–4]:

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

где I – спектральная интенсивность теплового излучения, Вт/(см²·мкм); $C_1 = 37418$ Вт·мкм⁴/см² и $C_2 = 14388$ мкм·К – константы; λ – длина волны, мкм.

После преобразования для области Вина при выполнении условия $C_2/(\lambda T) \gg 1$ получается

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

В случае «серого» тела, когда $\varepsilon(\lambda) = \text{const}$, выражение (2) описывает прямую линию в координатах $x = C_2/\lambda$ и $y = \ln(\lambda^5 I)$. Наклон прямой определяется температурой $T = -1/\alpha$.

В приёмнике с переносом заряда для регистрации светового сигнала используется полное число фотоэлектронов, которые накоплены в течение определённого времени Δt , а не интенсивность света (Вт/см²). Каждый пиксель на приёмнике содержит определённое количество электронов (N), которое связано с интенсивностью света по формуле (2):

$$I = N(h\nu) / \Delta t,$$

где $h\nu$ – энергия кванта (h – постоянная Планка $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; $\nu = c/\lambda$ – частота, где c – скорость света в вакууме $2,998 \cdot 10^8$ м/с).

Данный способ регистрации светового сигнала наиболее точен, т. к. учитывает не только текущую интенсивность излучения, но и время, в течение которого происходит накопление электронов. Поэтому выражение (2) примет вид [1]:

$$\ln(\lambda^4 N) - \ln(\epsilon C_1 / hc) = -\frac{C_2}{\lambda T}, \quad (3)$$

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

Таким образом, при построении экспериментального спектра в координатах (x, y) можно определить температуру объекта, не задаваясь значением коэффициента излучения. Влияние коэффициента ϵ видно только в параллельном смещении прямой по оси ординат, в то время как наклон остается неизменным.

Рассматриваемый в работе метод активно используется при нагреве, плавлении и охлаждении неметаллических тугоплавких материалов в среде термической плазмы, например, при определении точки эвтектики или фазовых переходов в системе «жидкое – пиропластичное – твердое» состояние. Стоит отметить, что метод СП может быть использован для контроля охлаждения материала после процесса плавления, чтобы избежать деформации или растрескивания материала.

Отдельной областью применения метода СП является измерение температуры поверхности материалов, подвергнутых воздействию плазменной струи [8–13]. В работе [9] проведены исследования нагрева мишени и динамики плазмы при горячем магнетронном распылении Nb. При проведении экспериментальных исследований по теплопередаче и визуализации течения плазменных струй, выходящих из щелевых сопел, особое место занимает СП [10]. В работе [11] проведены оптико-эмиссионные исследования плазменных вихревых колец при атмосферном давлении воздуха, в качестве одного из каналов в которых использовался спектрометр с диапазоном длин волн 300–1000 нм. J.E. Coleman разработал спектральный пирометр для пространственного разрешения температуры термической плотной плазмы [12]. Авторы работы [13] провели исследования распределения температуры в пилотном плазменном промежуточном звене и сравнили системы инициирования среды в рамках плазменной горелки и графитовых электродов.

На сегодняшний день активно развивается метод плазменного плавления компонентных шихт системы $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ при синтезе керамических материалов широкого спектра [14, 15, 16, 17, 18]. Применение метода СП позволит более детально раскрыть протекание фазовых превращений в трёхкомпонентных системах, а также определить граничные условия температурных диапазонов и факторов, влияющих на их протекание. В настоящей работе рассмотрено применение метода СП в процессе нагрева, плавления и охлаждения (кристаллизация поверхности) кварцевой мишени под воздействием плазменной струи при атмосферном давлении.

Методика и оборудование для спектральной пирометрии

Для регистрации спектров излучения, измерения цветовой и спектральной температуры разработан диагностический комплекс на основе малогабаритных спектрометров. Комплекс включает в себя:

– микроспектрометр HPSC 300 со спектральным диапазоном 380–780 нм, оптическое разрешение – 0,5 нм, диапазон измерения цветовой температуры – 1000–100 000 K, время накопления сигнала – 50–20000 мс. Производитель – Hangzhou Hoptoo Light and Color Technology, Китай;

– микроспектрометр STS-VIS, в основе которого лежит ПЗС-детектор с 1024 элементами со спектральным диапазоном 350–800 нм, оптическое разрешение – 1,0 нм FWHM (щель 10 мкм). Производитель – Ocean Optics, США;

– монохромная цифровая камера HT-SUA130GM-T.

В качестве эталонного источника света использовались электрические светоизмерительные широкодиапазонные лампы накаливания ТРУ 1100-2350 Н, СИРШ 6-100 и СИРШ 8,5-200-1 (таблица).

Характеристики электрических светоизмерительных широкодиапазонных ламп накаливания

Characteristics of electric light-measuring wide-range incandescent bulb

Модель	Яркостная температура, К/°С	Сила тока, А	Напряжение, В
ТРУ 1100-2350 Н	Не более 2623/2350	30,5	10
СИРШ 6-100	2840/2567	15,5	5,4
СИРШ 8,5-200-1	3000/2727	25	8,4

Принцип действия комплекса основан на предварительной калибровке спектральной чувствительности системы с применением всех оптических элементов. На первом этапе с использованием лазерного источника FVFL-204 (длина волны 650 нм, полуширина ± 20 нм) генерируется сигнал по оптоволоконному тракту (оптическое волокно с отверстием 200 мкм) с проекцией через объектив HELIOS-44-2 на уровень эталонной области вольфрамовой ленты. Диаметр визируемой области контролируется монохромной цифровой камерой HT-SUA130GM-T. Питание ламп осуществляется регулируемым источником питания NICE-POWER (30 А, 15 В). Для обеспечения достоверных световых параметров при определенной электрической нагрузке крайне важно сохранять лампу в данном режиме не менее 15 мин, поскольку именно за это время происходит достаточный прогрев всех металлических элементов лампы. В рамках первого этапа с использованием микроспектрометра HPSC 300 устанавливается зависимость цветовой температуры (T_c) от силы тока (I), протекающего по вольфрамовой ленте. На основе полученной зависимости определяется термодинамическая температура объекта с учетом излучательной способности вольфрама $\epsilon(\lambda, T)$ [1]:

$$T = \left[\frac{1}{T_c} + \frac{1}{C_2} \ln \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right) \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где T – действительная температура объекта, К; T_c – цветовая температура, К; $\varepsilon_{1,2}$, $\lambda_{1,2}$ – излучательная способность вольфрама на длине волны 530 и 650 нм при условии $C_2/\lambda T \gg 1$.

На рис. 1 представлен типичный спектр (а) и хроматическая диаграмма (б) в координатах $x(y)$ с указанием цветовой температуры $T_c = 2000$ К. Стоит отметить, что при расчете (4) получаем, что реальная температура объекта составляет 1972 К ($\Delta T = 1,4\%$).

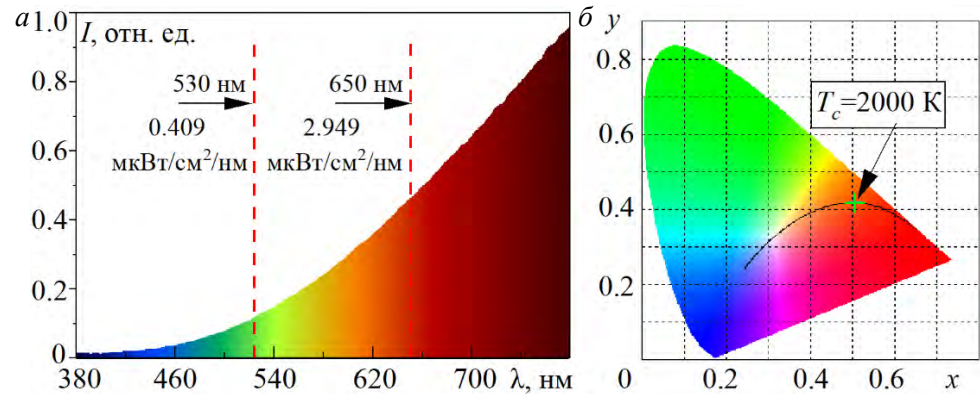


Рис. 1. Типичный спектр (а) и хроматическая диаграмма (б) в координатах $x(y)$ с указанием цветовой температуры $T_c = 2000$ К

Fig. 1. Typical spectrum (a) and chromatic diagram (b) in $x(y)$ coordinates. Color temperature: 2000 K

На рис. 2 представлены измеренные характеристики электрических светоизмерительных широкодиапазонных ламп накаливания.

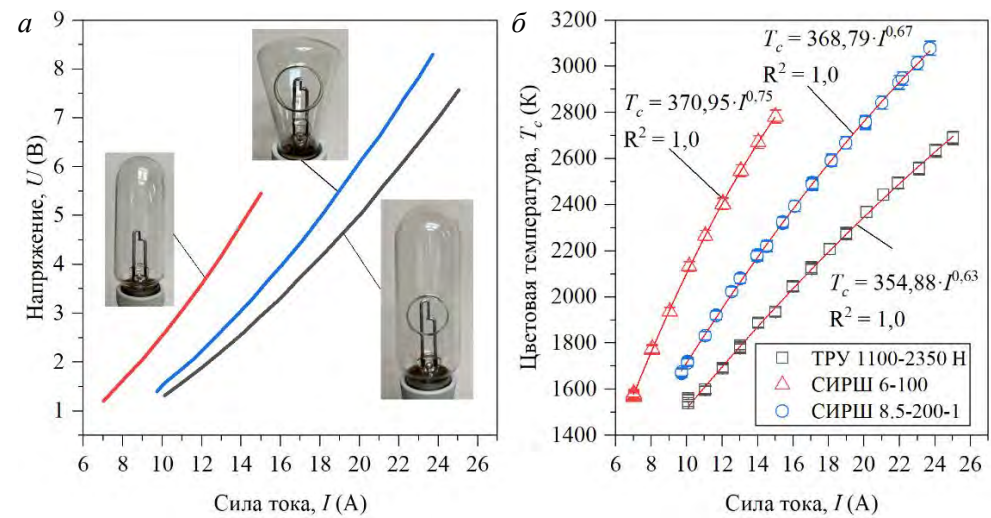


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика (а) и зависимость $T_c(I)$ (б) используемых электрических светоизмерительных широкодиапазонных ламп накаливания

Fig. 2. Volt-ampere characteristic (a) and $T_c(I)$ dependence (b) of photometric incandescent-filament lamps

Первичный спектр, регистрируемый с использованием микроспектрометра STS-VIS, требует корректировки в связи с тем, что чувствительность фотоприемника к разным длинам волн неодинакова. Чувствительность ПЗС-линейки имеет максимум в средней области и падает как в коротковолновой, так и в длинноволновой областях спектра. Для того чтобы получить спектр, не искаженный неоднородной чувствительностью спектрометра, необходимо определить коэффициент относительной спектральной чувствительности для каждого пикселя и учитывать эти коэффициенты при обработке данных. Определение коэффициентов спектральной чувствительности находится по соотношению

$$k = S/(\epsilon(T_w)I(T_w)),$$

где k – коэффициент спектральной чувствительности; S – измеренный уровень сигнала спектрометра; I – спектральная яркость излучения АЧТ на данной длине волны по закону Планка (при выбранной температуре T_w); ϵ – излучательная способность вольфрама при выбранной температуре.

На рис. 3 представлен исходный спектр, регистрируемый спектрометром, и спектр после коррекции с учетом спектральной чувствительности оптоэлектронного тракта прибора.

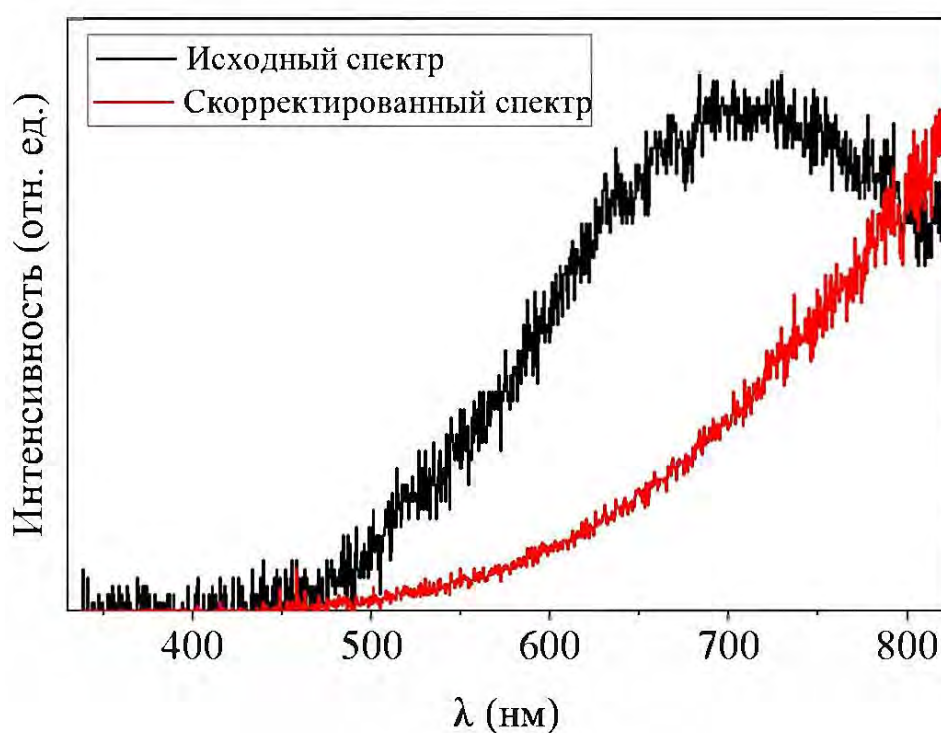


Рис. 3. Исходный сигнал спектрометра и восстановленный спектр теплового излучения объекта с температурой 2000 К (лампа СИРШ-8,5-200-1: сила тока 12,5 А, напряжение 2,4 В)

Fig. 3. Reference signal of the spectrometer and reconstructed spectrum of heat emission (2000 K) of lamp SIRSh-8.5-200-1. Current: 12.5 A. Voltage: 2.4 V

Использование СП при плазменном нагреве тугоплавких силикатных материалов

Для проведения экспериментальных исследований (рис. 4) была изготовлена мишень диаметром 25 и высотой 30 мм, состоящая из кварцита Чупинского месторождения (Карелия), содержание диоксида кремния SiO_2 в которой составляет до 99 масс. %. В качестве связующего использовался водный раствор силиката натрия Na_2SiO_3 .

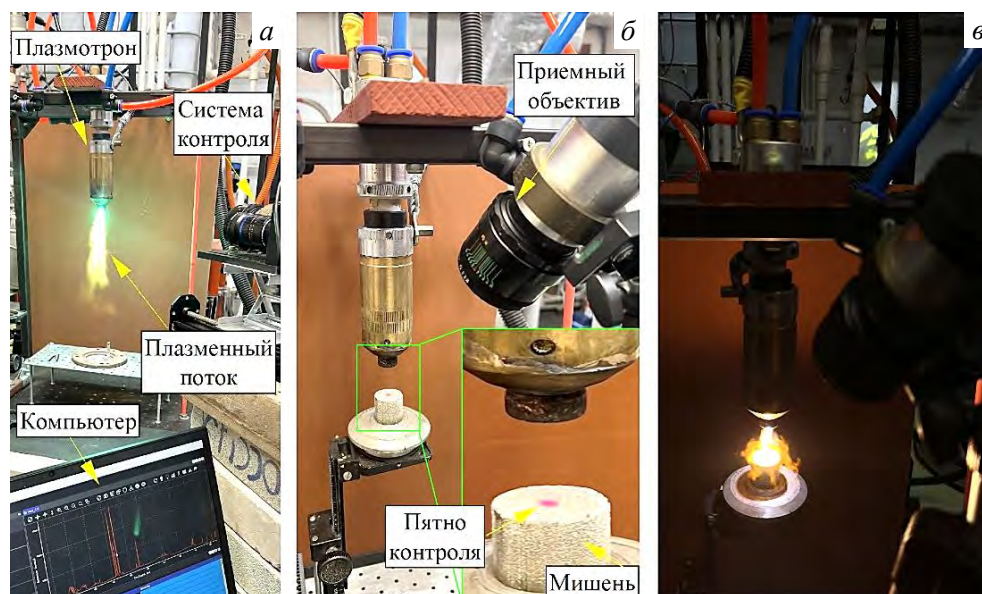


Рис. 4. Модельный эксперимент:

a – регистрация истекающей плазменной струи из сопла плазматрона; *б* – наводка, определение пятна контроля; *в* – процесс нагрева

Fig. 4. Model run:

a – plasma jet from plasma torch nozzle; *b* – control spot detection; *c* – target heating process

Нагрев кварцевой мишени осуществлялся электродуговым плазматроном мощностью 4 кВт (сила тока 40 А, напряжение 100 В). В качестве плазмообразующего газа использовался азот (расход 11 л/мин).

Данные измерений спектров излучения вдоль оси плазменной струи на расстоянии 10, 20 и 30 мм от сопла плазматрона свидетельствуют о наличии интенсивных полос излучения в диапазоне 375–400, 500–525 и 560–580 нм (рис. 5, *a*). Таким образом, для измерений температуры выбран спектральный диапазон 600–650 нм, свободный от собственного излучения плазмы (рис. 5, *б*).

На рис. 6 представлены типичные спектры излучения в исходном виде и после корректировки при нагреве (*a*) и остывании (*б*) образца. Время накопления сигнала – $5 \cdot 10^{-3}$ с.

В зарегистрированном спектре излучения при нагреве (воздействие плазменного потока) мишени наблюдается ярко выраженная фраунгоферон-

ная линия натрия длиной волны в интервале 589,592 и 588,995 нм. Это обусловлено испарением связующего Na_2SiO_3 , используемого при изготовлении мишени. На рис. 7 представлена динамика нагрева и охлаждения изготовленной мишени в течение 3 мин.

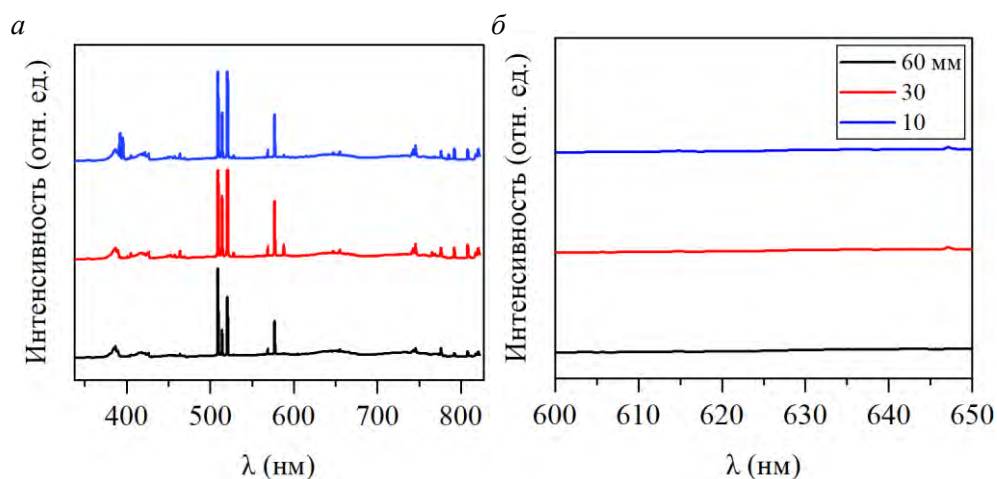


Рис. 5. Спектры излучения вдоль оси плазменной струи при различном расстоянии от сопла плазматрона:

a – общий вид; *б* – спектральный диапазон 600–650 нм, свободный от собственного излучения плазмы

Fig. 5. Radiation spectra along plasma jet axis at different distance from plasma torch nozzle: *a* – intensity in different emission bands; *b* – 600–650 nm spectral range free from plasma self-radiation

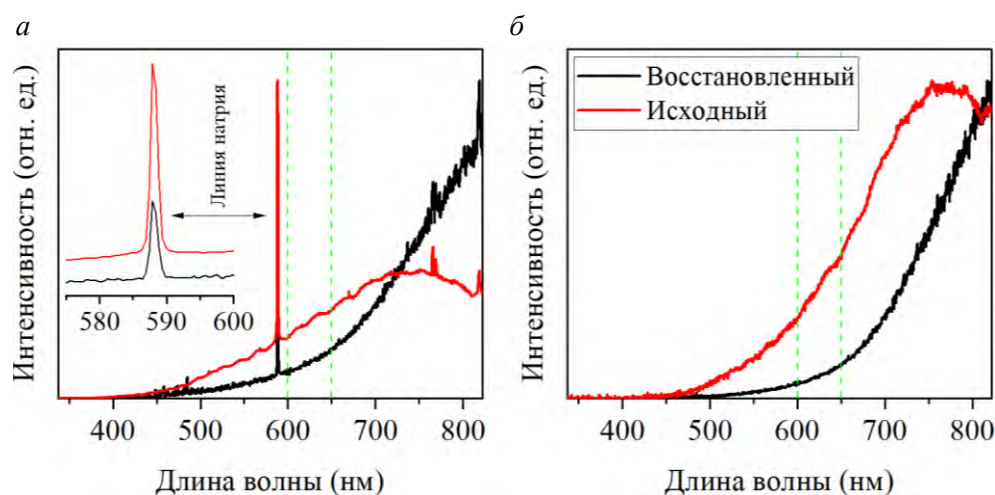


Рис. 6. Типичные спектры излучения в исходном виде и после корректировки при нагреве (*a*) и остывании (*б*) образца

Fig. 6. Emission spectra before and after correction during sample heating (*a*) and cooling (*b*)

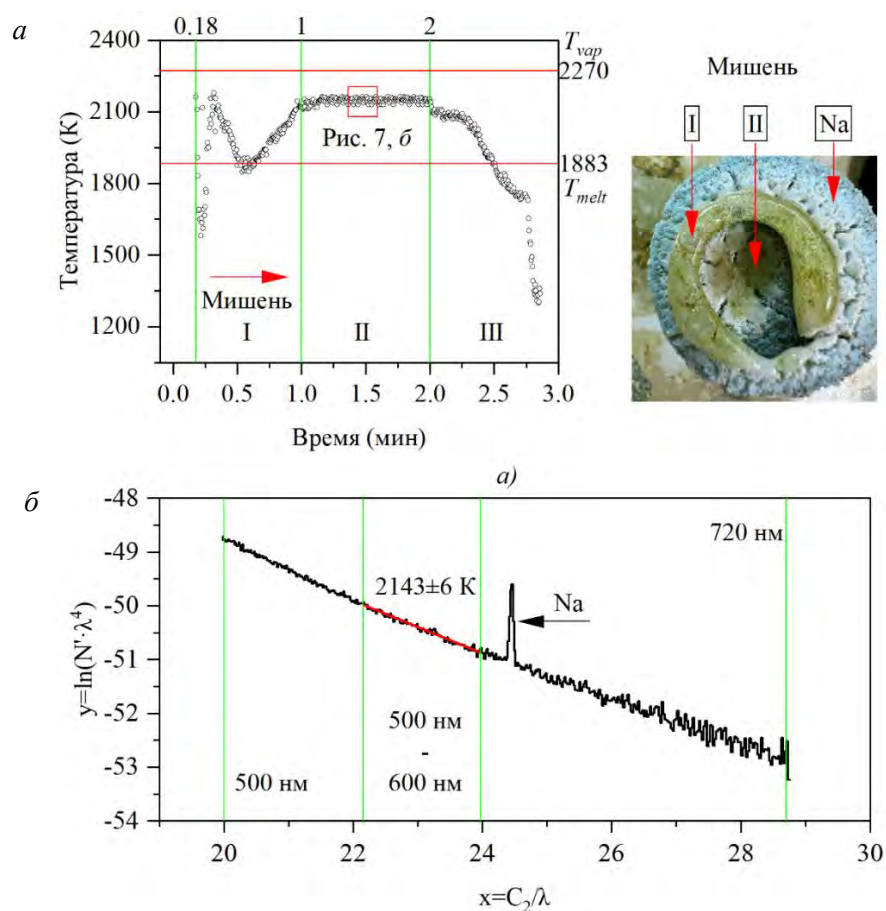


Рис. 7. Динамика нагрева и охлаждения кварцевой мишени (а) и участок 500–720 нм типичного спектра излучения в области II (б). Температура – (2143 ± 6) К

Fig. 7. Dynamics of heating and cooling of quartz target (a) and radiation over the spectral range of 500–720 nm in region II (b). Temperature: 2143 ± 6 K

Плазменный нагрев кварцевой мишени можно разделить на три этапа:

I этап – при взаимодействии плазменного потока с кварцевой мишенью происходит деформация поверхности за счёт фрагментации мелкодисперсных частиц от газодинамического напора плазменной струи, что отображается двумя локальными экстремумами на рис. 7, а. Стоит отметить, что во временном диапазоне от 10 до 20 с разброс температур составляет 1580–2179 К, $\Delta T \sim 600$ К. В интервале от 20 до 60 с наблюдается 1848–2179 К, $\Delta T \sim 330$ К. Уменьшение разности ΔT обосновано продвижением теплового потока вглубь мишени.

II этап – формирование стабильной области плавления за счёт образования контура из расплавленных частиц, который выступает в качестве сдерживающего барьера от разлета мелкодисперсных частиц. На рис. 7, б представлен участок 500–720 нм типичного спектра излучения в области II, из которого следует, что температура пятна контроля составляет (2143 ± 6) К. Формирование контура определяет еще тот факт, что расплав на основе SiO_2 обладает вы-

сокой вязкостью: при температурах 1800–2000 К вязкость варьируется от 10^8 до 10^6 Па соответственно.

III этап – при рассмотрении охлаждения (кристаллизация) конденсированного материала наблюдаются два плато: в районе 120–140 с, $T = (2081 \pm 20)$ К, и 155–165 с, $T = (1732 \pm 6)$ К, связанные с фазовыми переходами при кристаллизации конденсированной фазы. Скорость охлаждения в рамках температурного диапазона 2179 и 1300 К составляет (17 ± 3) К/с.

Заключение

Таким образом, в работе показана возможность применения малогабаритных спектрометров в рамках диагностики нагрева, плавления и охлаждения кварцевой мишени посредством плазменной струи атмосферного давления.

Установлено, что при взаимодействии плазменной струи с кварцевой мишенью наблюдаются три этапа, включающие деформацию поверхности, выход на стабильную температуру нагрева и охлаждение конденсированного материала, с точками фазовых переходов «жидкое – пиропластичное – твердое». Использование метода СП позволяет контролировать процесс нагрева и охлаждения, а также определить поведение материала при интенсивном взаимодействии с плазменной струей. В целом СП является важным инструментом в области пирометрии и дает возможность более глубокого изучения термических процессов при обработке и синтезе новых материалов на основе неметаллических тугоплавких соединений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия. Москва : Физматлит, 2012. 248 с.
2. Магунов А.Н., Захаров А.О., Лапишинов Б.А. Измерение нестационарной температуры методом спектральной пирометрии // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 1. С. 143–148.
3. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия объектов с неоднородной температурой // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. № 7. С. 78–82.
4. Araújo A. Multi-spectral pyrometry – a review // Measurement Science and Technology. 2017. № 28. P. 082002. DOI: 10.1088/1361-6501/aa7b4b
5. Dolmatov A.V., Milyukova I.V., Gulyaev P.Y. Investigation of structure formation in thin films by means of optical pyrometry // Journal of Physics: Conference Series. 2019. № 1281 (1). P. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/1281/1/012010
6. Fu T., Liu J., Duan M., Li S. Subpixel temperature measurements in plasma jet environments using high-speed multispectral pyrometry // Journal of Heat Transfer. 2018. № 140 (7). P. 071601. DOI: 10.1115/1.4038874
7. Muller M., Fabbro R. Temperature measurement of laser heated metals in highly oxidizing environment using 2D single-band and spectral pyrometry // Journal of Laser Applications. 2012. № 24 (2). P. 1–11. DOI: 10.2351/1.3701400
8. Sotnikova G.Y., Alexandrov S.A., Voronin A.V., Urzhumtsev N.A. Two-color pyrometry methods for measuring the surface temperature of materials exposed to a plasma jet // Journal of Communications Technology and Electronics. 2022. № 67. P. 79–83. DOI: 10.1088/0022-3735/20/6/008
9. Leonova K., Britun N., Konstantinidis S. Target heating and plasma dynamics during hot magnetron sputtering of Nb // Journal of Physics D: Applied Physics. 2022. № 55 (34). P. 345202. DOI: 10.1088/1361-6463/ac72d0
10. Chaplygin A.V., Gordeev A.N. Heat transfer and flow visualization experiments for plasma jets issuing from slit nozzles // AIP Conference Proceedings. 2021. № 2351. P. 030067. DOI: 10.1063/5.0052124

11. Volodin L.Y., Kamrukov A.S. Optical emission study of plasma vortex rings at atmospheric pressure air // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. № 1393 (1). P. 012063. DOI: 10.1088/1742-6596/1393/1/012063
12. Coleman J.E. A spectral pyrometer to spatially resolve the blackbody temperature of a warm dense plasma // *Review of Scientific Instruments*. 2016. № 87 (12). P. 123113. DOI: 10.1063/1.4973433
13. Badie J.M., Bertrand Ph., Flamant G. Temperature distribution in a pilot plasma tundish: Comparison between plasma torch and graphite electrode systems // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2001. № 21 (2). P. 279–299. DOI: 10.1023/A:1007004532610
14. Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Кунц О.А. Плазменная технология синтеза форстеритового материала // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2023. Т. 25. № 1. С. 166–175. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-1-166-175
15. Шеховцов В.В., Волокитин О.Г., Уииков В.А., Зорин Д.А. Получение стеклокерамики системы MgO-SiO₂ методом плазменной плавки // *Письма в Журнал технической физики*. 2022. Т. 48. № 24. С. 15–18. DOI: 10.21883/PJTF.2022.24.54017.19278
16. Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г., Гафаров Р.Е. Синтез муллитсодержащей керамики в среде низкотемпературной плазмы // *Физика и химия стекла*. 2022. Т. 48. № 5. С. 630–634. DOI: 10.31857/S0132665121100619. EDN: UNKROE
17. Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Улмасов А.Б. Синтез алюмомagneзильной керамики MgAl₂O₃ в среде термической плазмы // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022. Т. 24. № 3. С. 138–146. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-138-146
18. Шеховцов В.В. Стеклокерамика на основе шпинели MgAl₂O₄, полученная методом плазменной плавки // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2023. Т. 25. № 3. С. 151–161. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-151-161

REFERENCES

1. Magunov A.N. Spectral pyrometry. Moscow: Fizmatlit, 2012. 248 p. (In Russian)
2. Magunov A.N., Zakharov A.O., Lapshinov B.A. Measurements of nonstationary temperatures by the spectral pyrometry method. *Instruments and Experimental Techniques*. 2012; 55: 134–139. (In Russian)
3. Magunov A.N. Spectral pyrometry of objects with nonuniform temperature. *Technical Physics*. 2010. 55: 991–995.
4. Araújo A. Multi-spectral pyrometry – A review. *Measurement Science and Technology*. 2017. 28: 082002. DOI: 10.1088/1361-6501/aa7b4b
5. Dolmatov A.V., Milyukova I.V., Gulyaev P.Y. Investigation of structure formation in thin films by means of optical pyrometry. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. 1281(1): 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/1281/1/012010 (In Russian)
6. Fu T., Liu J., Duan M., Li S. Subpixel temperature measurements in plasma jet environments using high-speed multispectral pyrometry. *Journal of Heat Transfer*. 2018; 140 (7): 071601. DOI: 10.1115/1.4038874
7. Muller M., Fabbro R. Temperature measurement of laser heated metals in highly oxidizing environment using 2D single-band and spectral pyrometry. *Journal of Laser Applications*. 2012. 24 (2): 1–11. DOI: 10.2351/1.3701400
8. Sotnikova G.Y., Alexandrov S.A., Voronin A.V., Urzhumtsev N.A. Two-color pyrometry methods for measuring the surface temperature of materials exposed to a plasma jet. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2022. 67: 79–83. DOI: 10.1088/0022-3735/20/6/008
9. Leonova K., Britun N., Konstantinidis S. Target heating and plasma dynamics during hot magnetron sputtering of Nb. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2022. 55 (34): 345202. DOI: 10.1088/1361-6463/ac72d0
10. Chaplygin A.V., Gordeev A.N. Heat transfer and flow visualization experiments for plasma jets issuing from slit nozzles. *AIP Conference Proceedings*. 2021. 2351: 030067. DOI: 10.1063/5.0052124

11. Volodin L.Y., Kamrukov A.S. Optical emission study of plasma vortex rings at atmospheric pressure air. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. 1393(1): 012063. DOI: 10.1088/1742-6596/1393/1/012063
12. Coleman J.E. A spectral pyrometer to spatially resolve the blackbody temperature of a warm dense plasma. *Review of Scientific Instruments*. 2016. 87(12): 123113. DOI: 10.1063/1.4973433
13. Badie J.M., Bertrand Ph., Flamant G. Temperature distribution in a pilot plasma tundish: Comparison between plasma torch and graphite electrode systems. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2001. 21 (2): 279–299. DOI:10.1023/A:1007004532610
14. Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Kunts O.A. Thermal plasma sintering of forsterite ceramics. *Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25(1): 166–175. DOI:10.31675/1607-1859-2023-25-1-166-175 (In Russian)
15. Shekhovtsov V.V., Volokitin O.G., Ushkov V.A., Zorin D.A. Plasma melting of glass ceramics of the MgO–SiO₂ system. *Pisma v ZhTF*. 2022; 48 (24): 15–18. DOI: 10.21883/PJTF.2022.24.54017.19278 (In Russian)
16. Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Gafarov R.E. Synthesis of mullite-containing ceramics in a low-temperature plasma. *Glass Physics and Chemistry*. 2022; 48 (5): 630–634. DOI: 10.31857/S0132665121100619. EDN: UHKROE
17. Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Ulmasov A.B. Synthesis of aluminum-magnesian ceramics MgAl₂O₃ in thermal plasma environment. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (3): 138–146. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-138-146 (In Russian)
18. Shekhovtsov V.V. MgAl₂O₄-based glass ceramics synthesized by thermal plasma melting. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (3): 151–161. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-151-161 (In Russian)

Сведения об авторе

Шеховцов Валентин Валерьевич, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, shehovcov2010@yandex.ru

Author Details

Valentin V. Shekhovtsov, PhD, Assistant Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, shehovcov2010@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 03.07.2023
Одобрена после рецензирования 28.07.2023
Принята к публикации 21.09.2023

Submitted for publication 03.07.2023
Approved after review 28.07.2023
Accepted for publication 21.09.2023