

Применение метода двухспектральной пирометрии для измерения температуры поверхности материалов, находящихся под воздействием плазменной струи

Г. Ю. Сотникова, С. А. Александров, А. В. Воронин, Н. А. Уржумцев

Обоснован выбор радиационного высокоскоростного метода измерения температуры поверхности объекта, находящегося под воздействием струи водородной плазмы. Проведена теоретическая оценка вклада интенсивности рекомбинационного и тормозного излучения плазмы на показания пирометра, из которой следует, что при определенных условиях водородную плазму можно считать прозрачной для теплового излучения в области длин волн среднего ИК-диапазона спектра (MWIR).

Рассмотрен инфракрасный пирометр спектрального отношения, выполненный на не охлаждаемой двухспектральной фотодиодной MWIR сэндвич-структуре, разработанный для контроля температуры исследуемого объекта в экспериментальной установке водородной плазменной пушки. Приведены экспериментальные результаты мониторинга температуры поверхности образцов композитных материалов в процессе импульсного воздействия плазмы.

Ключевые слова: пирометр спектрального отношения, MWIR фотодиодный сэндвич, композитные материалы, водородная плазма, пристеночная плазма.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-88-94

Введение и постановка задачи

В настоящее время активно проводятся фундаментальные и прикладные исследования, направленные на изучение взаимодействия плазмы с веществом [1, 2]. В такого рода исследованиях на материал оказываются сверхвысокие тепловые нагрузки (до сотен ГВт/м²), которые, целенаправленно или вы-

нужденно, приводят к изменению его физических (тепловых, механических, оптических) свойств. Качественную и количественную оценку этих свойств можно осуществлять посредством контроля динамики изменения температуры образцов как в процессе воздействия мощного теплового импульса (нагревание образца), так и после его окончания (остывание образца) [3].

К особенностям импульсного плазменного нагрева можно отнести передаваемый образцу кратковременный большой тепломеханический импульс [4], способный разрушать поверхностный слой, и сложный процесс теплообмена плазмы с образцом, при котором образуется пристеночная плазма, с протекающими в ней химическими реакциями. Из этих особенностей вытекают основные проблемы связанные с измерением температуры: большие скорости протекания тепловых процессов в тонком слое образца, возникающие структурные изменения, которые сказываются на

Сотникова Галина Юрьевна¹, с.н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: gga_holo@mail.ru. g.sotnikova@mail.ioffe.ru
Александров Сергей Евгеньевич¹, н.с.

Воронин Александр Васильевич¹, с.н.с., к.т.н.
Уржумцев Никита Алексеевич^{1,2}, лаборант, студент.
¹ ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН.

Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

² Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения.

Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая
Морская, 67, лит. А.

Статья поступила в редакцию 28 июля 2022 г.

© Сотникова Г. Ю., Александров С. Е., Воронин А. В.,
Уржумцев Н. А., 2022

излучательной способности поверхности, а также интенсивное излучение пристеночной плазмы в видимом диапазоне [5].

В таких условиях возможно применение лишь бесконтактных методов измерения температуры, а именно метода двухспектральной пирометрии вне видимого диапазона излучения. В данном методе расчет температуры производится из отношения регистрируемых мощностей теплового излучения объекта на двух близкорасположенных спектральных линиях в средней ИК-области. Это позволяет исключить влияние коэффициента излучения образца исследуемого материала (ϵ), который в большинстве случаев неизвестен и с большой вероятностью меняется в процессе плазменного нагрева. Кроме того, в отличие от других радиационных методов измерения температуры, двухспектральный метод не чувствителен к изменению формы и площади измеряемой поверхности, а также возможного ослабления излучения в промежуточной среде (загазованность, запыление защитных стекол и др.) [6].

Описание эксперимента

На рис. 1 приведена фотография экспериментальной установки – стенда водородной плазменной пушки с пирометрическим сенсором для контроля температуры образца исследуемого материала. Эксперимент по изучению влияния плазмы на различные материалы происходит следующим образом: коаксиальный ускоритель генерирует импульс водородной плазмы длительностью $\sim 10\text{--}15$ мкс, плотностью частиц до 10^{15} см $^{-3}$ и кинетической энергией протонов до 300 эВ. Плотность мощности потока струи достигала 100 ГВт/м 2 [7], который сталкивается с образцом, расположенном в крестовине (отмечена цифрой 3 на рис. 1); пирометр, направленный на поверхность образца, регистрирует излучение по двум спектральным каналам, лежащим в области среднего ИК.

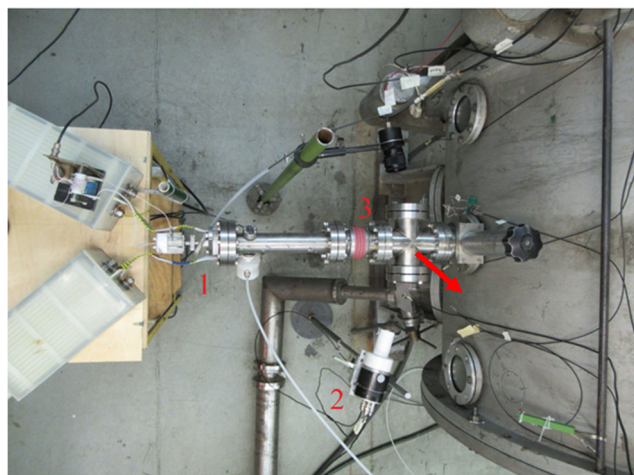


Рис. 1. Фотография экспериментальной установки: коаксиальный ускоритель (1), пирометр (2), место расположения исследуемого образца (3)

Теоретическое обоснование выбора спектрального диапазона измерения температуры

Одним из основных факторов, ограничивающих возможности радиационных методов измерения температуры образцов является интенсивное рекомбинационное излучение и излучение пристеночной плазмы, возникающей при торможении плазменной струи при столкновении с образцом исследуемого материала. Тормозное излучение возникает в результате рассеяния ионов и электронов в электрическом поле плазмы.

На рис. 2 приведены результаты теоретических расчетов [5] зависимости плотности мощности рекомбинационного и тормозного излучения от температуры водородной плазменной струи у стенки образца (эВ), для трех различных концентраций частиц. На этом же графике приведена зависимость удельной мощности теплового излучения объекта в области 3 мкм (при условии $\epsilon \approx 1$) от температуры поверхности материала. Выбор этой длины волны обусловлен решением использовать в качестве чувствительного элемента пирометра фотодетекторов среднего ИК-диапазона спектра (MWIR). Расчет приведен для различной концентрации частиц без учета примесей в пристеночной плазме.

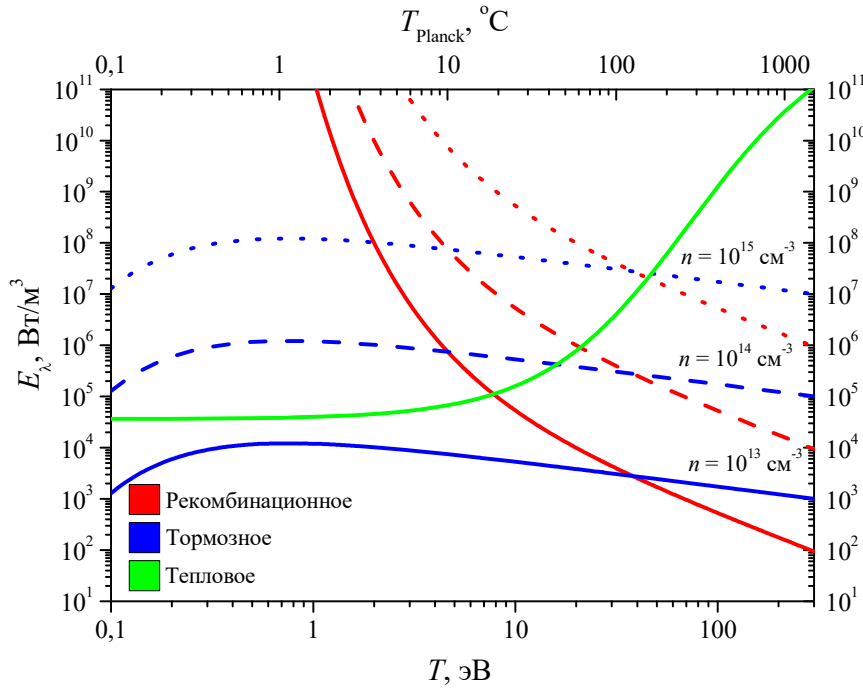


Рис. 2. Зависимость плотности мощности рекомбинационного, тормозного и теплового излучения от температуры плазмы и образца соответственно

Из графика можно сделать вывод, что при определенных условиях (при температуре плазмы более 10 эВ и умеренной концентрации частиц) пристеночную плазму можно считать прозрачной для теплового излучения поверхности образца. С учетом отсутствия интенсивных линий излучения водорода в области 3–4 мкм выбор MWIR-диапазона спектра для пирометрических измерений можно считать обоснованным и использовать для решения поставленной задачи фотодиодные гетероструктуры среднего ИК-диапазона, разработанные в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН [8].

Двухспектральный пирометрический сенсор: основные характеристики, функция преобразования (расчета температуры), градуировка

Основным элементом, определяющим все измерительные возможности пирометров, является его чувствительный элемент. Специально для задач мультиспектральной пирометрии был разработан сдвоенный фотодиод (сэндвич-структура), представляющий собой две последовательно склеенные гетероструктуры InSb и InAsSb [8]. Первый слой имеет максимум чувствительности к излучению в интервале 3,0–3,4 мкм, второй слой – в интервале 3,8–4,3 мкм (по уровню спектральной чувствительности 0,5 от максимума). Особен-

ности технологии изготовления используемой фотодиодной структуры – освещение со стороны подложки (флип-чип конфигурация) и иммерсионное сопряжение с кремниевой линзой (полусфера диаметром 3 мм) обеспечивают не только увеличение детектирующей способности фотоприемника за счет увеличения его эффективной площади при сохранении уровня собственных шумов, но и подавление излучения в видимой спектральной области не менее чем на 120 дБ [9]. Последнее особенно важно для применения пирометров в экспериментах, связанных с наличием сильных засветок в видимой области спектра.

Каждый слой сэндвич-структуры, представляющий собой самостоятельный фотодетектор, имеет свой электрический выход. Таким образом, в чувствительном элементе при детектировании происходит спектральное разделение излучения от объекта на 2 канала: канал 1 регистрирует излучение в спектральном диапазоне $\Delta\lambda_1 = (3,2 \pm 0,2)$ мкм, а канал 2 – в спектральном диапазоне $\Delta\lambda_2 = (4,05 \pm 0,25)$ мкм.

Регистрируемые гетероструктурами токи преобразуются в измеряемые вольтовые сигналы независимыми схемами усиления/фильтрации сигналов в полосе частот 2 МГц, выполненных на основе малошумящих прецизионных операционных усилителей (ОУ), характеристики которых оптимизирова-

ны для включения средневолновых ФД с низким темновым сопротивлением [10].

Чип сэндвич-структуры вместе с микросхемой ОУ сдвоенного усилителя помещены в герметичный корпус на термоэлемент Пельтье (ТЭП), который является элементом конструкции корпуса, что необходимо для температурной стабилизации характеристик сдвоенного фотодиода и ОУ. Температура сэндвич-структуры и схем предварительных усилителей/преобразователей токов стабилизируется на уровне $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и поддерживается с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$ при минимальном энергопотреблении ТЭП. Управление температурой стабилизации осуществляется микропроцессором.

На базе данного фотодиода был разработан двухспектральный пирометр отношения, электронная часть которого обеспечивала детектирование теплового излучения и линейное преобразование в вольтовые сигналы по двум спектральным каналам в полосе частот до 2 МГц. Далее эти сигналы поступали на блок оцифровки и передачи данных на компьютер для дальнейшей обработки. В наших экспериментах был использован 4-канальный цифровой осциллограф с 12 разрядным АЦП и полосой пропускания 100 МГц (АСК-3107 фирмы Актаком).

Оптическая схема пирометра выполнена на основе фокусирующей линзы из селенида цинка (фокусное расстояние $f = 10$ см, диаметр $d = 2$ см). В совокупности с кремниевой линзой, установленной непосредственно на фотодиодной сэндвич-структуре, такая схема обеспечивает измерение температуры на участке объекта диаметром 2 см на расстоянии до 1,5 м (что соответствует показателю визирования 1:75).

С учетом относительной узкополосности спектральных каналов фотодиодной сэндвич-структуры ($\Delta\lambda/\lambda \approx 0,1$) для установления связи между регистрируемым сигналом (током фотодиода) и температурой объекта T можно использовать монохроматическое выражение для спектральной плотности регистрируемого теплового излучения с единицы площади поверхности объекта в виде закона Планка в приближении Вина, которое можно рассматривать как передаточную функцию измерительного канала пирометра:

$$I(T) = I_0 + A \times \frac{C_1}{\lambda_{eff}^5} \times \exp\left(\frac{C_2}{\lambda_{eff} T}\right) \quad (1)$$

где I_0 – темновой ток фотодиода; A – коэффициент градуировки, зависящий от площади исследуемого объекта, его излучательной способности, ε , коэффициента пропускания промежуточной среды и параметров его оптической и электрической схем; C_1 и C_2 – постоянные Планка, $C_1 = 3,7415 \times 10^{-4}$ Вт мкм², $C_2 = 14388$ мкм К; λ_{eff} – эффективная длина волны, соответствующая максимуму спектральной чувствительности фотоприемника.

Такое приближение позволяет получить простую функциональную зависимость для расчета температуры из отношения полезных сигналов с двух независимых выходов двухспектрального пирометра, чувствительных в узких спектральных областях вблизи 3 мкм – $I(3)$ и 4 мкм – $I(4)$:

$$T = C_2 \left(\frac{1}{\lambda_{eff}(4)} - \frac{1}{\lambda_{eff}(3)} \right) \times \left(\ln \left(\frac{\lambda_{eff}^5(3) SR(3/4)}{\lambda_{eff}^5(4) K} \right) \right)^{-1} - 273, \quad (2)$$

где $SR(3/4) = (I(3) - I_0(3))/(I(4) - I_0(4))$ – отношение токов на выходе фотодиодной сэндвич-структуры, $\lambda_{eff}(3)$ и $\lambda_{eff}(4)$ – эффективные значения длин волн измерительных каналов пирометра и $K = A_1/A_2$ – коэффициент пирометра, зависящий только от конфигурации его оптической и электрической схем.

Градуировка пирометра была проведена на образце материала из нержавеющей стали и образцах композитных материалов с неизвестными значениями излучательной способности: углеродного композитного материала (УКМ) и кварцевого композитного материала (ККМ), которые затем исследовались на плазменной установке. Образец материала из неполированной отожженной (при 1000°C) нержавеющей стали рассматривался нами в качестве модели абсолютно черного тела (АЧТ), так как по данным [11] потенциально обладает максимальным из известных материалов значением излучательной способности в диапазоне температур до 600°C с характер-

ным для всех металлов плавным увеличением ε с ростом температуры. Образцы помещались в муфельную печь с встроенной термопарой, где нагревались до 850–950 °С. Температура поверхности образца регистрировалась одновременно с помощью эталонной хромель-алюмелевой термопары и пирометра по каналам 3 мкм и 4 мкм. Далее проводилась ап-

проксимация полученных данных с помощью выражения (1) с подбором значений эффективных длин волн в пределах диапазона спектральной чувствительности ФД, коэффициентов градуировки и темновых токов для каждого из измерительных спектральных каналов. Результаты градуировки представлены на рис. 3.

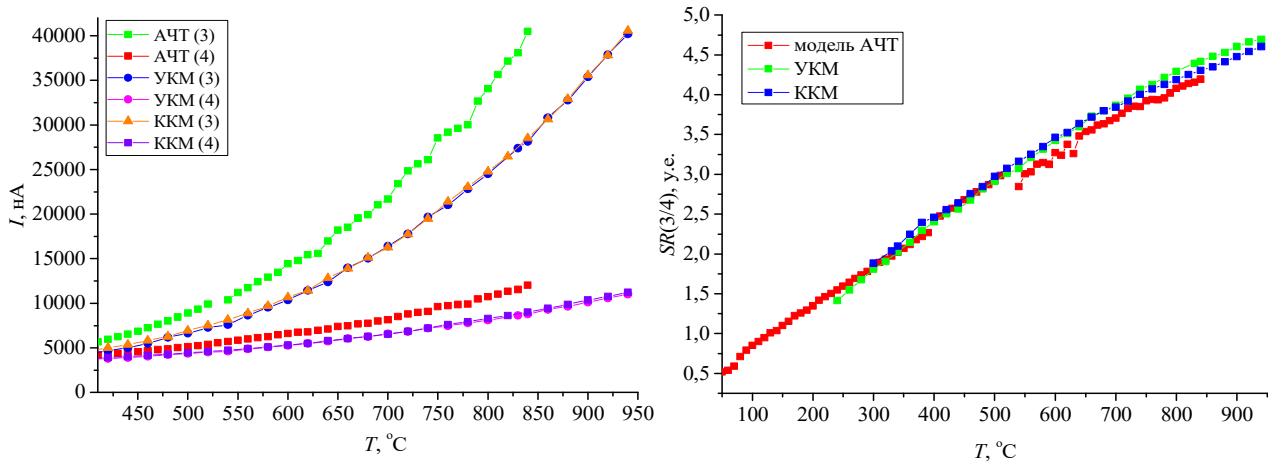


Рис. 3. Градуировочные зависимости для каждого из спектральных каналов пирометра (слева) и для отношения сигналов двух спектральных каналов (справа), полученные для различных материалов

Как видно из рис. 3, несмотря на существенное отличие величины сигналов по отдельным спектральным каналам, полученных на образце, близком по своим характеристикам к модели АЧТ, и образцах с неизвестной (более низкой) излучательной способностью, выходной сигнал двухспектрального пирометра отношения оказывается одинаковым. Это является убедительным доказательством независимости сигнала пирометра от характеристик материала и, что особенно важно, позволяет проводить его градуировку и периодическую поверку на произвольном объекте в лабораторных условиях.

Полученные результаты позволили оценить экспериментально неопределенность расчета температуры с использованием (2). По пяти независимым сериям градуировки, выполненных на различных образцах, экспериментально подтвержденная погрешность расчетов лежит в пределах $\pm 1,5\%$ относительно расчетов с использованием формулы Планка для температур до 1200 °С. Это соответствует лучшим образцам двухспектральных пирометров [12].

Экспериментальные результаты: анализ и перспективы

Эксперименты проводились на различных образцах композитных материалов при напряжении на конденсаторном накопителе ускорителя 5 кВ.

На рис. 4 приведены зависимости от времени сигналов тока на ускорителе и результатов расчета температуры в соответствии с выражением (2) для углеродного композитного материала (УКМ), кварцевого композитного материала с оплавленной поверхностью (ККМО) и с не оплавленной поверхностью (ККМ).

Из сравнения полученных данных видно, что существует различие механизмов взаимодействия плазмы с образцами различного состава и структуры. О различии теплофизических свойств кварцевого и углеродного композитного материала можно судить по разной пиковой температуре нагрева поверхности образцов, отличающейся на ~200–300 °С при одинаковом напряжении на ускорителе.

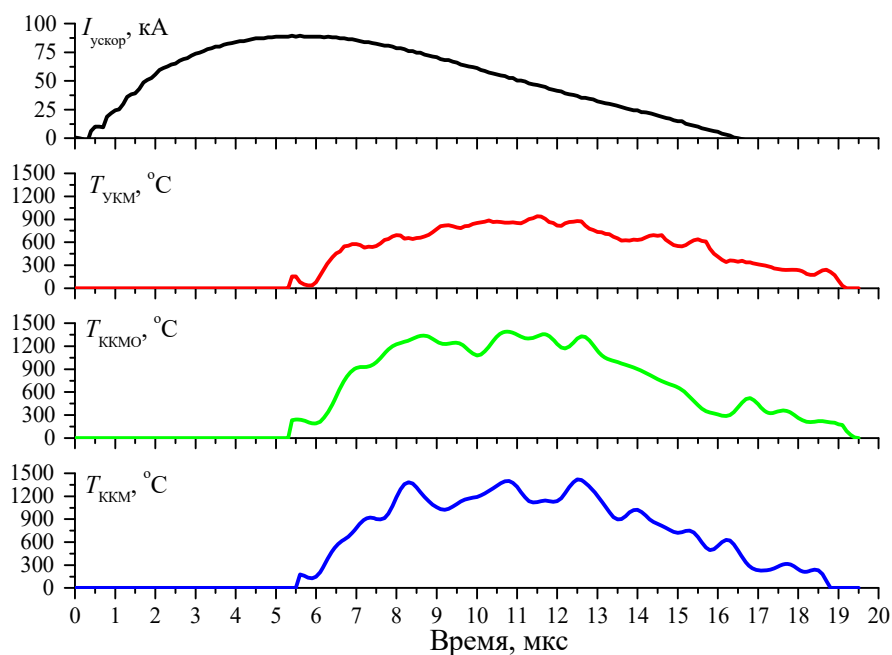


Рис. 4. Временные зависимости сигнала тока на ускорителе и динамика изменения температуры поверхности различных композитных материалов

Интерпретация полученных результатов измерений и расчетов осложняется не до конца изученными физическими процессами взаимодействия водородной плазмы с композитными материалами разного химического состава и структуры, а также не до конца изученными свойствами самой плазмы.

Заключение

Показана принципиальная возможность контроля динамики изменения температуры поверхности различных материалов с высоким временным разрешением (1 мкс) в процессе импульсного воздействия плазмы. Однако, большое число внешних воздействующих факторов требует дополнительных экспериментов и создания информационно-измерительной модели, учитывающей многообразие физических процессов при взаимодействии плазмы с поверхностью материалов, для обоснования достоверности, надежности и точности измерений температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pitts A., Carpentier S., Escourbiac F., Hirai T., Komarov V., Lisgo S., Kukushkin A. S., Loarte A., Merola M., Sashala Naik A., Mitteau R., Sugihara M., Bazylev B., Stangeby P. C. // Journal of Nuclear Materials. 2013. Vol. 438. P. 48.
2. Ueda Y., Coenen J. W., De Temmerman G., Doerner R. P., Linke J., Philipps V., Tsitron E. // Fusion Engineering and Design. 2014. Vol. 89. P. 901.
3. Российская метрологическая энциклопедия. – СПб: Метрологическая академия РФ, 2001.
4. Воронин А. В., Судьенков Ю. В., Семенов Б. Н., Атрошенко С. А., Наумова Н. С. // ЖТФ. 2014. Т. 84 (7). С. 36.
5. Лукьянов С. Ю. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. – М.: Наука, 1975.
6. Фрунзе А. // Фотоника. 2009. № 4. С. 32.
7. Воронин А. В., Гусев В. К., Герасименко Я. А., Судьенков Ю. В. // ЖТФ. 2013. Т. 83 (8). С. 36.
8. www.ioffeled.com
9. Александров С. Е., Гаврилов Г. А., Сотникова Г. Ю., Тер-Мартirosян А. Л. // ФТП. 2014. Т. 48. С. 135.
10. Гаврилов Г. А., Матвеев Б. А., Сотникова Г. Ю. // Письма ЖТФ. 2011. Т. 37 (18). С. 50.
11. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Советское радио, 1978.
12. PYROMETER OVERVIEW. <https://www.advancedenergy.com>

Two-color pyrometry methods for measuring the surface temperature of materials exposed to a plasma jet

G. Yu. Sotnikova¹, S. A. Alexandrov¹, A. V. Voronin¹, and N. A. Urzhumtsev^{1,2}

¹ Ioffe Institute

26 Politekhnikheskaya st., St. Petersburg, 194021, Russia

E-mail: gga_holo@mail.ru. g.sotnikova@mail.ioffe.ru

² Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67 Bolshaya Morskaya st., St. Petersburg, 190000, Russia

Received July 28, 2022

The choice of a radiation high-speed non-contact method for measuring the surface temperature of an object under the influence of a hydrogen plasma jet is substantiated.

A theoretical assessment was made of the contribution of the intensity of recombination and bremsstrahlung plasma radiation to the pyrometer readings. It is shown that under certain conditions hydrogen plasma can be considered transparent to the thermal radiation of the material in the mid-IR wavelength (MWIR) range of 3–5 μm .

An infrared spectral ratio pyrometer based on an uncooled two-spectral MWIR photodiode sandwich structure designed to control the temperature of an object under study in an experimental setup of a hydrogen plasma gun is considered. The experimental results of monitoring the surface temperature of some composite materials samples in the process of pulsed plasma exposure are presented.

Keywords: spectral ratio pyrometer, two-spectral MWIR photodiode sandwich, composite materials, hydrogen plasma, plasma-wall interaction

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-88-94

REFERENCES

1. R. A. Pitts, S. Carpentier, F. Escourbiac, T. Hirai, V. Komarov, S. Lisgo, A. S. Kukushkin, A. Loarte, M. Merola, A. Sashala Naik, R. Mitteau, M. Sugihara, B. Bazylev, and P. C. Stangeby, *Journal of Nuclear Materials* **438**, 48 (2013).
2. Y. Ueda, J. W. Coenen, G. De Temmerman, R. P. Doerner, J. Linke, V. Philipps, and E. Tsitron, *Fusion Engineering and Design* **89**, 901 (2014).
3. *Russian metrological encyclopedia*. (St. Petersburg, Metrological Academy of the Russian Federation, 2001) [in Russian].
4. A. V. Voronin, Y. V. Sud'enkov, B. N. Semenov, S. A. Atroshenko, and N. S. Naumova, *Tech. Phys.* **59** (7), 981 (2014).
5. S. Yu. Lukyanov, *Hot plasma and controlled nuclear fusion*. (Nauka, Moscow, 1975) [in Russian].
6. A. Frunze, *Photonics Russia*, No. 4, 32 (2009).
7. A. V. Voronin, V. K. Gusev, Y. A. Gerasimenko, and Y. V. Sud'enkov, *Tech. Phys.* **58** (8), 1122 (2013).
8. www.ioffeled.com
9. S. E. Aleksandrov, G. A. Gavrilov, G. Y. Sotnikova, and A. L. Ter-Martirosyan, *Semiconductors* **48** (1), 129 (2014).
10. G. A. Gavrilov, B. A. Matveev, and G. Y. Sotnikova, *Tech. Phys. Lett.* **37** (9), 866 (2011).
11. L. Z. Kriksunov, *Reference book on the basics of infrared technology*. (Soviet radio, Moscow, 1978) [in Russian].
12. PYROMETER OVERVIEW. www.advancedenergy.com