

Научная статья
УДК 544.032.52
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.002

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ

Ирина Валерьевна Багрий

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
Санкт-Петербург, Россия
bagriy240398@gmail.com*

Аннотация

Рассматривается спектроскопический метод определения температуры электродуговой плазмы. Представлены результаты исследований, проведённых с использованием спектрального анализа эмиссионных линий меди. Указанный метод позволяет определять электронную составляющую температуры. Для электродуговой плазмы при выполнении принципа локального термодинамического равновесия она приблизительно равна средней температуре (энергии) всех типов частиц. Рассчитанная по методу Больцмана температура электродуговой воздушной плазмы равна 5100–5450 К.

Ключевые слова:

эмиссионная спектроскопия, электродуговая плазма, переменный ток, электронные спектры атома меди, определение температуры, метод Больцмана

Для цитирования:

Багрий И. В. Спектроскопическое определение температуры электродуговой плазмы // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2024. Т. 15, № 1. С. 18–23. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.002.

Original article

SPECTROSCOPIC DETERMINATION OF THE TEMPERATURE OF AN ELECTRIC ARC AIR PLASMA

Irina V. Bagriy

*Saint-Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, Russia
bagriy240398@gmail.com*

Abstract

The article discusses a spectroscopic method for determining the temperature of an electric arc plasma. The results of studies conducted using spectral analysis of copper emission lines are presented. This method allows you to determine the electronic component of the temperature. For electric arc plasma, when the principle of local thermodynamic equilibrium is fulfilled, this temperature is approximately equal to the average temperature (energy) of all types of particles. The temperature of the electric arc air plasma calculated by the Boltzmann method is 5100–5450 K.

Keywords:

emission spectroscopy, electric arc plasma, alternating current, electronic spectra of a copper atom, temperature determination, Boltzmann method

For citation:

Bagriy I. V. Spectroscopic determination of the temperature of an electric arc air plasma // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 18–23. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.002.

Введение

В последние десятилетия электродуговая плазма стала широко применяться в различных областях, таких как металлургия, энергетика, химическая промышленность и др. [1]. Для эффективного использования плазмы необходимо контролировать её параметры, включая температуру. В данной статье представлен метод спектроскопического определения температуры электродуговой воздушной плазмы, генерируемой высоковольтным однофазным плазмотроном переменного тока, а также результаты проведённых экспериментов и расчётов.

Для измерения температуры электродуговой плазмы переменного тока предпочтительно использовать методы бесконтактного определения, такие как метод атомно-эмиссионной спектроскопии [2]. Спектроскопические методы определения температуры плазмы основаны на измерении интенсивности спектральных линий, испускаемых плазмой [3]. Существует несколько способов расчёта температуры

плазмы по спектральным линиям, в данной работе использовался метод расчёта температуры по относительным интенсивностям — метод Больцмана. В нём используется соотношение между интенсивностью спектральной линии и вероятностью нахождения электрона на определённом энергетическом уровне.

В современном мире широко используются плазмохимические технологии для различных целей, включая создание новых материалов и модификацию поверхностей [4, 5]. Исследование параметров плазмы, включая её температуру, играет важную роль в развитии этих технологий [6, 7]. Эти методы широко применяются для анализа элементного состава материалов и определения различных характеристик образцов. В статье рассматривается метод измерения электронной температуры воздушной плазмы по электронным спектрам переходов атома меди для разработки плазмохимических процессов.

Материалы и методы

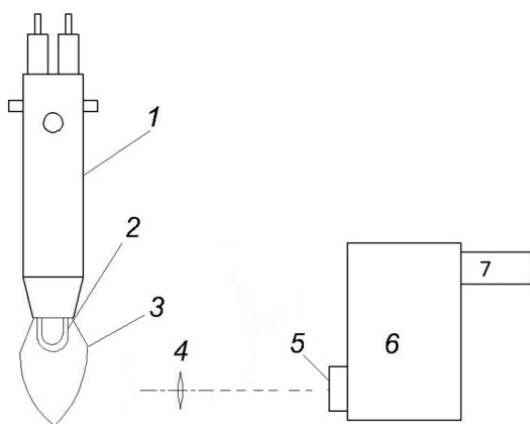


Рис. 1. Схема спектральных измерений:

1 — высоковольтный однофазный плазмотрон переменного тока; 2 — электрическая дуга; 3 — факел; 4 — линза; 5 — дифракционная щель; 6 — спектрометр Andor Shamrock SR-303i-A; 7 — ПЗС камера

Воздушная плазма была получена с помощью однофазного электродугового плазмотрона переменного тока. Для получения спектров был использован спектрометр Andor Shamrock SR-303i-A.

Воздух представляет собой сложную смесь газов. Электрическая дуга зажигается между двумя медными электродами, далее в приэлектродной области происходит испарение меди и возбуждение её атомов. Таким образом, для спектроскопических исследований целесообразно использовать спектры её электронных переходов [8]. Схема спектральных измерений представлена на рис. 1.

В качестве расчётного выбран метод Больцмана, основывающийся на измерении отношения интенсивностей двух спектральных линий одного элемента, находящихся на разных

энергетических уровнях ионизации. Расчёты ведутся по формуле

$$I_{nk} = \frac{h\nu_{nk}}{4\pi} \cdot \frac{A_{nk}g_n}{S} \cdot N \cdot e^{-\frac{E_{nk}}{kT}}, \quad (1)$$

где I_{nk} — интенсивность характерной линии электронного перехода атома меди; h — постоянная Планка; k — постоянная Больцмана; ν_{nk} и A_{nk} — частоты и вероятности соответствующих переходов электрона, g_n — статистический вес соответствующего энергетического уровня; S — статистическая сумма состояний атома водорода; N — концентрация ионов и атомов; E_{nk} — энергия перехода электрона атома водорода с уровня n на уровень k .

По формуле (1) видна зависимость интенсивности от температуры. Для перехода к относительным единицам измерения интенсивности необходимо рассматривать минимум пару спектральных линий и отношение их интенсивностей (2) для выражения температуры (3). В уравнениях (2) и (3) символы β и γ соответствуют двум разным спектральным линиям перехода соответствующего атома:

$$\frac{I_\gamma}{I_\beta} = \frac{\nu_\gamma A_\gamma g_\gamma}{\nu_\beta A_\beta g_\beta} \cdot e^{-\frac{E_\beta - E_\gamma}{kT}}; \quad (2)$$

$$T = \frac{\frac{E_\gamma - E_\beta}{k}}{\left[\ln \left(\frac{\nu_\gamma A_\gamma g_\gamma}{\nu_\beta A_\beta g_\beta} \right) - \ln \left(\frac{E_\gamma}{E_\beta} \right) \right]}. \quad (3)$$

Перед началом измерения производилась калибровка по длинам волн с помощью ртутно-аргоновой лампы марки AvaLight-CAL, светящей в диапазоне от 254 до 965 нм, и фиксировались фоны излучения, которые учитывались в последующей спектральной обработке.

Результаты

Перед началом измерения фиксировались фоны излучения, которые учитывались в последующей спектральной обработке. Полученные спектры приведены на рис. 2, а результаты расчётов температуры по этим спектрам и описанному выше методу представлены в таблице.

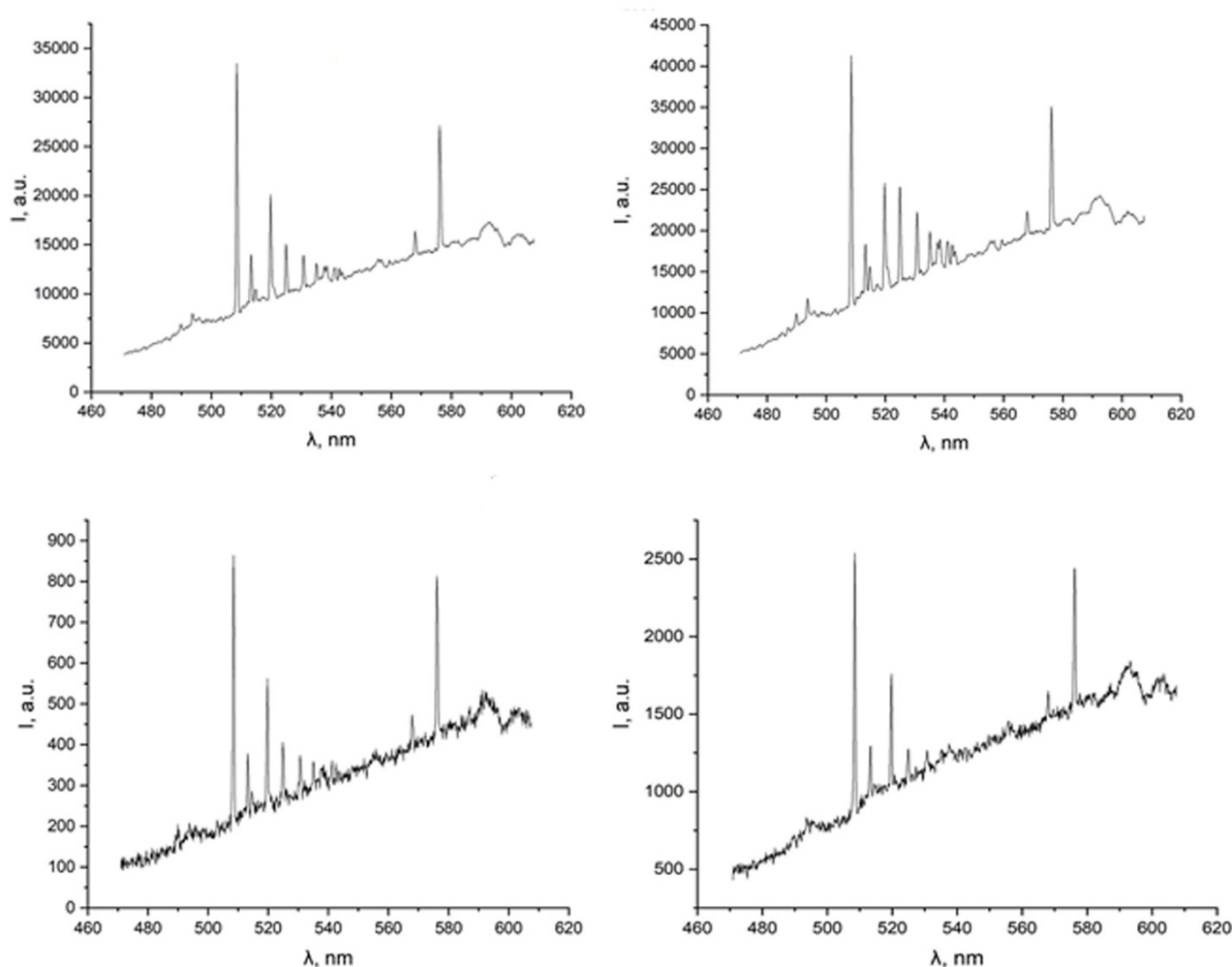


Рис. 2. Полученные спектры

Для расчёта температуры по формуле (3) используются отношения интенсивностей спектральных линий одного элемента с одной степенью ионизации, в данном случае — пять спектральных линий меди с длинами волн 510,554, 515,324, 521,820, 570,024 и 578,213 нм.

Для определения электронной составляющей температуры вычисляли среднее арифметическое между всеми парами электронных переходов. Результаты расчётов также приведены в таблице, где использовались экспериментальные данные (λ , I) и информация из открытой базы данных NIST Atomic Spectra Database (ASD) (ϵ , E , g). Температуру определяли согласно выражению (3) [9]. Температура электродуговой воздушной плазмы, полученной однофазным плазмотроном переменного тока, равна 5250 ± 50 К.

Расчёт температуры электродуговой плазмы по методу Больцмана

Длина волны (λ), нм					T, K
510,554	515,324	521,820	570,024	578,213	
Энергия (ϵ), эВ					
1,39	3,79	3,82	1,64	1,64	
Энергия (E), 1018 Дж					
8,68	23,66	23,84	10,24	10,24	
Статистический вес (g)					
1,0000	0,2131	0,4674	0,1410	0,6931	5100 ± 50
1,0000	0,2586	0,5466	0,1917	0,8450	5200 ± 50
1,0000	0,2277	0,4925	0,1851	0,7655	5150 ± 50
1,0000	0,3525	0,6657	0,6186	0,7804	5450 ± 50

Обсуждение

Проведённые по формулам (1) и (2) расчёты показали, что температура электродуговой воздушной плазмы варьируется от 5000 до 5500 К. Минимальное значение составляет примерно 5100 К, максимальное — около 5450 К. Использовались константы для соответствующих электронных переходов атомов меди. Определение температуры плазмы в высоковольтном плазмотроне переменного тока с медными электродами методом Больцмана позволило получить значения 5100–5450 К. Эти результаты могут быть полезны для различных промышленных и научных целей, таких как утилизация вредных соединений и создание материалов с уникальными свойствами. Для более глубокого исследования необходимо измерение атомной составляющей температуры.

Спектроскопическое определение температуры плазмы является точным методом измерения её параметров, так как при анализе спектра можно учитывать не только температуру, но и другие физические параметры и химические элементы.

Список источников

1. The future for plasma science and technology / K. D. Weltmann [et al.] // Plasma Processes and Polymers. 2019. Vol. 16, No. 1. P. 1800118. <https://doi.org/10.1002/ppap.201800118>.
2. Laser induced breakdown spectroscopy methods and applications: A comprehensive review / S. K. H. Shah [et al.] // Radiation physics and chemistry. 2020. Vol. 170. P. 108666. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108666>.
3. Electric arc shape and weld bead geometry analysis under the electromagnetic constriction and expansion effect / M. G. Antonello [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. P. 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08064-5>.
4. Green M. A. Third generation photovoltaics: Ultra-high conversion efficiency at low cost // Progress in photovoltaics: Research and Applications. 2001. Vol. 9, No. 2. P. 123–135. <https://doi.org/10.1002/ppap.201500187>.

5. Hong H. J., Nasrollahi A., Park S. Y. Transparent UV-blocking photonic film based on reflection of cholesteric liquid crystals // *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 344. P. 117739. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117739>
6. Experimental study on the role of the target electron temperature as a key parameter linking recycling to plasma performance in JET-ILW / B. Lomanowski [et al.] // *Nuclear Fusion*. 2022. Vol. 62, No. 6. P. 066030. doi:10.1088/1741-4326/ac5668.
7. Diagnosis of atmospheric pressure low temperature plasma and application to high efficient methane conversion / S. Kado [et al.] // *Catalysis Today*. 2004. Vol. 89, No. 1–2. P. 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2003.11.036>
8. Ali Y. A., Khamis R. A. Spectroscopic study of copper plasma produced by Nd: YAG laser from the nano and bulk copper targets // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021. Vol. 1818, No. 1. P. 012008. doi:10.1088/1742-6596/1818/1.
9. NIST Atomic Spectra Bibliographic Databases // National Institute of standards and technology U.S. Department of commerce. URL: <https://www.nist.gov/pml/nist-atomic-spectra-bibliographic-databases> (accessed 24.02.2024).

References

1. Weltmann K. L.-D., Kolb J. F., Holub M., Uhrlandt D., Simek M., Ostrikov K., Hamaguchi S., Cvelbar U., Cernak M., Locke B., Fridman A., Favia P., Becker K. The future for plasma science and technology. *Plasma Processes and Polymers*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 1800118. <https://doi.org/10.1002/ppap.201800118>.
2. Shah S. K. H., Iqbal J., Ahmad P., Khandaker M. U., Haq S., Naeem M. Laser induced breakdown spectroscopy methods and applications: A comprehensive review. *Radiation physics and chemistry*, 2020, Vol. 170, pp. 108666. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108666>.
3. Antonello M. G., Bracarense A. Q., Silva R. H. G., Pigozzo I. O., Okuyama M. P. Electric arc shape and weld bead geometry analysis under the electromagnetic constriction and expansion effect. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, Vol. 5, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08064-5>.
4. Green M. A. Third generation photovoltaics: Ultra-high conversion efficiency at low cost. *Progress in photovoltaics: Research and Applications*, 2001, Vol. 9, No. 2, pp. 123–135. <https://doi.org/10.1002/ppap.201500187>
5. Hong H. J., Nasrollahi A., Park S. Y. Transparent UV-blocking photonic film based on reflection of cholesteric liquid crystals. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, Vol. 344, pp. 117739. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117739>.
6. Lomanowski B., Dunne M., Vianello N., Aleiferis S., Brix M., Canik J., Carvalho I. S., Frassinetti L., Frigione D., Garzotti L., Groth M., Meigs A., Menmuir S., Maslov M., Pereira T., von Thun C. P., Reinke M., Refy D., Rimini F., Rubino G., Schneider P. A., Sergienko G., Uccello A., Van Eester D. JET Contributors. Experimental study on the role of the target electron temperature as a key parameter linking recycling to plasma performance in JET-ILW. *Nuclear Fusion*, 2022, Vol. 62, No. 6, pp. 066030. doi:10.1088/1741-4326/ac5668.
7. Kado Sh., Sekine Y., Nozaki T., Okazaki K. Diagnosis of atmospheric pressure low temperature plasma and application to high efficient methane conversion. *Catalysis Today*, 2004, Vol. 89, No. 1–2, pp. 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2003.11.036>.
8. Ali Y. A., Khamis R. A. Spectroscopic study of copper plasma produced by Nd: YAG laser from the nano and bulk copper targets. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2021, Vol. 1818, No. 1, pp. 012008. doi:10.1088/1742-6596/1818/1.

9. NIST Atomic Spectra Bibliographic Databases. National Institute of standards and technology U.S. Department of commerce. Available at <https://www.nist.gov/pml/nist-atomic-spectra-bibliographic-databases> (accessed 24.02.2024).

Информация об авторе

И. В. Багрий — студентка.

Information about the author

I. V. Bagriy — Student.

Статья поступила в редакцию 03.04.2024; одобрена после рецензирования 05.04.2024; принята к публикации 12.04.2024.
The article was submitted 03.04.2024; approved after reviewing 05.04.2024; accepted for publication 12.04.2024.