

УДК 533.9.082.5

Спектральная диагностика плазменного потока абляционного импульсного плазменного ускорителя

Щербakov Лев Александрович	lsherbakov@yandex.ru
Гололобов Данила Антонович	gololobov-2003@mail.ru
Пасынкова Дарья Сергеевна	pasynkova@bmstu.ru
Полевой Данил Евгеньевич	polevoy@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Определен диапазон значений температуры электронов по спектру излучения плазменного потока абляционного импульсного плазменного ускорителя с помощью метода относительных интенсивностей, основанного на распределении Больцмана. Диапазон значений температуры электронов составил $2,09 \text{ эВ} \pm 8,21 \%$. Рассмотрено влияние погрешностей прямых спектральных измерений на определение электронной температуры. Температура электронов в данном методе показывает значение в пике импульсного разряда, для определения изменения температуры электронов по времени необходимы спектральные измерения с временным разрешением. В дальнейшем планируется произвести определение изменения температуры по времени, а также по данным спектра определить концентрацию электронов и другие различные характеристики.

Ключевые слова: спектроскопия, импульсный разряд, температура электронов, метод относительных интенсивностей, абляционный импульсный плазменный ускоритель

Plasma flow spectral diagnostics of an ablative pulsed plasma accelerator

Scherbakov Lev Aleksandrovich	lsherbakov@yandex.ru
Gololobov Danila Antonovich	gololobov-2003@mail.ru
Pasynkova Darya Sergeevna	pasynkova@bmstu.ru
Polevoi Danil Evgenievich	polevoy@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. Electron temperature values range is determined from the radiation spectrum of ablative pulsed plasma accelerator flux using relative intensity method based on the Boltzmann distribution. The range of electron temperature values was $2.09 \text{ eV} \pm 8.21 \%$. The errors influence in direct spectral measurements on electron temperature determination is considered. Electron temperature in this method shows value at the pulse discharge peak, and spectral measurements with time resolution are required to determine the electrons temperature change over time. It is planned to determine the temperature change over time, as well as determine electrons concentration and other various characteristics from the spectrum data.

Keywords: spectroscopy, pulsed discharge, electron temperature, relative intensity method, ablative pulsed plasma accelerator

Введение. Определение температуры электронов в абляционном импульсном плазменном ускорителе (АИПУ) необходимо для понимания процессов, происходящих в плазме устройства [1]. Так, температура электронов напрямую влияет на ионизацию, является показателем эффективности нагрева, абляции и тяги ускорителя, что крайне важно учитывать при проектировании и модернизации АИПУ [2]. Актуальность работы заключается в нахождении простого метода определения температуры электронов импульсного разряда, что в дальнейшем поможет упростить моделирование процессов, происходящих как в АИПУ, так и в импульсных плазмотронах, лампах и других газоразрядных устройствах.

Спектральный анализ — бесконтактный метод, который в комбинации с другими методами дает возможность оценить эффективность работы ускорителя и понять физические процессы, происходящие в плазменном источнике [3, 4]. В данной работе определение температуры электронов производится по спектру импульсного плазменного разряда.

Материалы и методы. АИПУ, состоящий из двух коаксиальных электродов (диаметр внутреннего электрода: 3 мм, диаметр внешнего электрода: 18 мм) и диэлектрической вставки из полиоксиметилена, был помещен в вакуумную камеру, которая была откачана до остаточного давления $5 \cdot 10^{-5}$ Торр. Напряжение разряда составляло 1,5 кВ с энерговкладом 5,6 кДж. Разряд имел периодический характер (4–5 полупериодов), при этом максимальная сила тока в первом полупериоде составляла 5,6 кА, а длительность первого периода — 5 мкс. Подробное описание экспериментального стенда приведено в работах [5, 6].

Спектральные измерения проводились при помощи спектрометра Solar S100 вдоль плазменного потока. Оптоволоконно спектрометра располагалось соосно с АИПУ за кварцевым окном вне вакуумной камеры.

Используя спектр излучения плазменного потока АИПУ, производился расчет температуры электронов методом относительных интенсивностей спектральных линий, основанный на предположении, что заселенность возбужденных уровней атомов или ионов в плазме описывается распределением Больцмана [7]. Интенсивность линии излучения пропорциональна числу атомов в возбужденном состоянии [8]. В таком случае, можно получить:

$$f(E_i) = \ln \left(\frac{I_{ij} \cdot \lambda_{ij}}{g_i \cdot A_{ij}} \right) = - \frac{E_i}{kT_e} + \text{const}, \quad (1)$$

где I_{ij} — интенсивность линии (переход с уровня i на уровень j), отн. ед.; λ_{ij} — длина волны спектральной линии, нм; g_i — статистический вес; A_{ij} — вероятность перехода, с^{-1} ; E_i — энергия возбужденного состояния, эВ; k — постоянная Больцмана, эВ/К; T_e — температура электронов, К. Значения $g_i \cdot A_{ij}$, E_i находятся из баз данных, например NIST ASD [9].

Зависимость (1) в координатах $\ln (I_{ij} \cdot \lambda_{ij} / (g_i \cdot A_{ij}))$ от E_i описывает прямую, по углу наклона которой можно определить температуру электронов [7].

Результаты. Пример спектра излучения плазмы абляционного импульсного плазменного ускорителя представлен на рис. 1. Определение температу-

ры электронов производилось по интенсивностям 4 пиков первого иона углерода, которые отмечены на рис. 1. Исходные данные для расчета температуры электронов приведены в таблице.

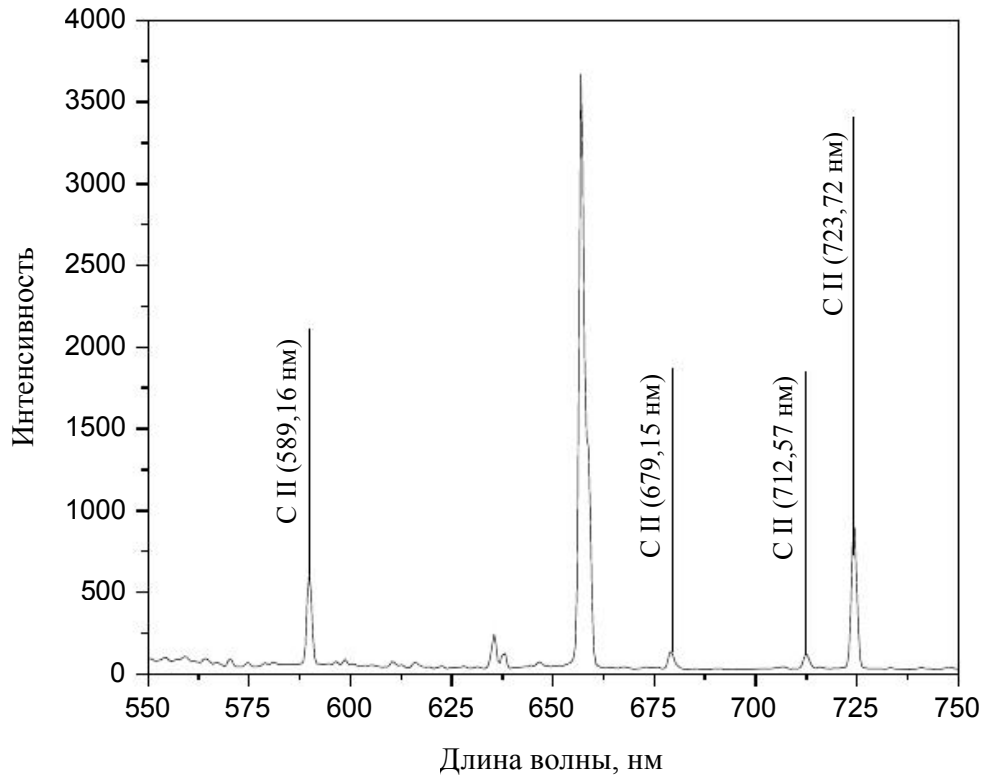


Рис. 1. Спектр плазмы абляционного импульсного плазменного ускорителя

Исходные данные для расчета температуры электронов

Пик	λ , нм	I_{ij} , отн. ед.	$g_i A_{ij}$, с ⁻¹	E_i , см ⁻¹	E_i , эВ
1	589,16	612,11	$6,98 \cdot 10^7$	162517,9	20,15
2	679,15	133,98	$7,52 \cdot 10^7$	181711,05	22,53
3	712,57	117,7	$6,12 \cdot 10^7$	195765,88	24,27
4	723,72	893,63	$2,78 \cdot 10^7$	145549,25	18,05

Так как погрешность спектральных измерений составляет 10 %, то по этой погрешности для каждой интенсивности в таблице можно определить наибольшее и наименьшее возможные значения ($I_{ij} \pm 0,1I_{ij}$). Такой разброс интенсивностей приводит к изменению наклона прямой (рис. 2).

Расчет максимального наклона прямой m производится для первой половины точек с наибольшим отклонением, а для остальных — с наименьшим, расчет минимального наклона производится в обратном порядке. Максимальный наклон равен $m_1 = \operatorname{tg}(\alpha_1) = -0,521$, минимальный $m_2 = \operatorname{tg}(\alpha_2) = -0,442$.

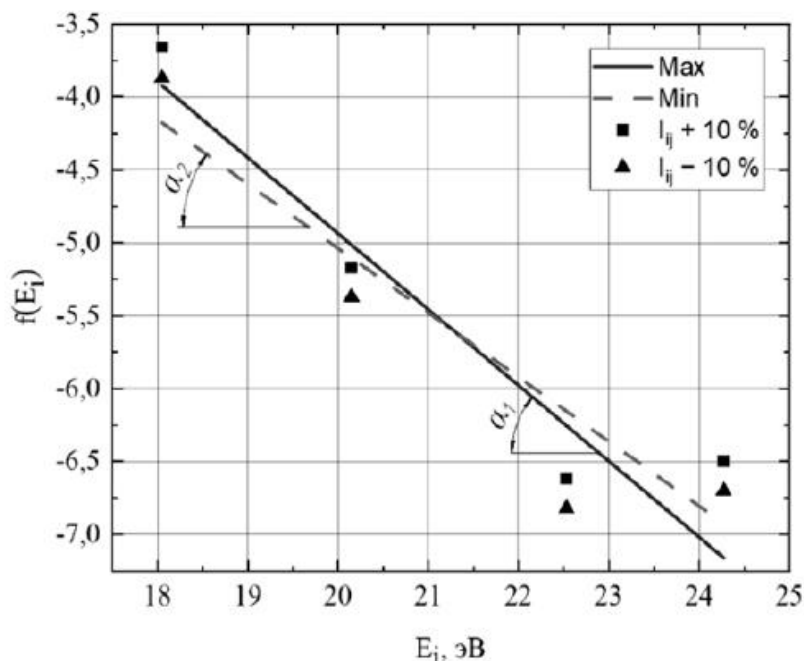


Рис. 2. Определение температуры электронов, используя зависимость (1)

Температура электронов рассчитывается по формуле [7]:

$$T_e = -\frac{1}{k\alpha}. \quad (2)$$

В результате, температура электронов плазменного потока АИПУ, рассчитанная по методу относительных интенсивностей спектральных линий, составила от 1,92 до 2,26 эВ.

Обсуждение полученных результатов. Полученный диапазон значений температуры электронов от 1,92 до 2,26 эВ типичен для плазмы в АИПУ [10]. Поскольку полученная погрешность меньше на 1,8 %, чем погрешность спектрометра, значит, что точность исходных измерений крайне важна для данного метода. Температура электронов в данном методе показывает значение в пике импульсного разряда, для определения изменения температуры электронов по времени необходимы спектральные измерения с временным разрешением.

Заключение. В работе определена температура электронов в плазме АИПУ методом относительных интенсивностей спектральных линий — 2,09 эВ $\pm 8,21\%$. Температура электронов в данном методе показывает значение в пике импульсного разряда.

В дальнейшем, планируется произвести определение изменения температуры по времени, а также по данным спектра определить концентрацию электронов и другие различные характеристики (это требует учета дополнительных параметров, в том числе уширения линий).

Работа выполнена на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию FSN-2024-0007.

Список источников

- [1] Любинская Н.В. Абляционный импульсный плазменный двигатель для перспективных малоразмерных космических аппаратов. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2020, 164 с.
- [2] Mazouffre S. Electric propulsion for satellites and spacecraft: established technologies and novel approaches. *Plasma Sources Science and Technology*, 2016, vol. 25 (3), pp. 1–27. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/3/033002>
- [3] Shumeiko A.I., Telekh V.D., Ryzhkov S.V. Probe Diagnostics and Optical Emission Spectroscopy of Wave Plasma Source Exhaust. *Symmetry*, 2022, vol. 14 (10). <https://doi.org/10.3390/sym14101983>
- [4] Nauschütt B.T., Chen L., Holste K., Klar P.J. Non-invasive assessment of plasma parameters inside an ion thruster combining optical emission spectroscopy and principal component analysis. *EPJ Techniques and Instrumentation*, 2021, vol. 8 (13). <https://doi.org/10.1140/epjti/s40485-021-00070-x>
- [5] Egoshin D.A., Fedorova D.K., Pasyukova D.S. et al. Estimation of the Propellant Ablation Rate in a Pulse Discharge. *High Energy Chemistry*, 2024, vol. 58, pp. 137–141. <https://doi.org/10.1134/S0018143924700759>
- [6] Pavlov A.V., Shchepanyuk T.S., Skriabin A.S., Telekh V.D. Gas Dynamics Processes above the Polymers Surface under Irradiation with Broadband High-Brightness Radiation in the Vacuum Ultraviolet Spectrum Region. *Polymers*, 2022, vol. 14, art. no. 3940. <https://doi.org/10.3390/polym14193940>
- [7] Peterson B.J., Miyazawa J., Nishimura K. et al. Characteristics of Radiating Collapse at the Density Limit in the Large Helical Device. *Plasma Fusion Research*, 2006, vol. 1 (045), pp. 1–9. <https://doi.org/10.1585/pfr.1.045>
- [8] Salzmann D. *Atomic physics in hot plasmas*. Oxford University Press, 1998, 270 p. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195109306.001.0001>
- [9] *National Institute of Standards and Technology (NIST)*. URL: https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html (дата обращения 11.08.2025).
- [10] Горевой А.Т., Егоров И.Д. Зондовые измерения параметров потока плазмы абляционного импульсного плазменного ракетного двигателя. *Современные методы диагностики плазмы и их применение*, 2024, № 10, с. 49–51.

Б2

**Энергетические
и транспортные
установки и двигатели**

