

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕЙТЕРИЕВОЙ ЛАМПЫ ДДС-30

П.В. Золотарев

pavelzolotaryov@ya.ru
SPIN-код: 4508-2420

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

При спектральных исследованиях в качестве источника часто применяют лампу ДДС-30 с дейтериево-неоновым наполнением, которая дает сплошной спектр излучения в фиолетовой и ультрафиолетовой областях излучения. С помощью монохроматора МДР-206 зарегистрированы спектры излучения плазмы и показано, что в области длин волн 300...450 нм наблюдается высокая интенсивность непрерывного излучения. Проведено исследование излучательных характеристик лампы, экспериментально определены параметры плазмы и показано превышение зарегистрированной в этой области мощности над расчетной, связанной с рекомбинационным излучением. Отмеченная аномалия может быть связана, по-видимому, с передачей возбуждения от атомов неона молекулам дейтерия.

Ключевые слова

Дейтериевая плазма, лампа ДДС-30, монохроматор МДР-206, рекомбинационное излучение, аномальный континуум, графический метод определения температуры, определение плотности плазмы, спектральная испускательная способность

Поступила в редакцию 04.06.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. Дуговая спектральная лампа ДДС входит, например, в состав осветителя ОЗКдг — одной из комплектующих монохроматора МДР-206. Помимо дейтерия лампа также содержит инертный газ — неон, который оказывает заметное влияние на энергетические характеристики источника [1]. Цель настоящей работы — регистрация спектра дейтериевой плазмы, выявление области аномальной интенсивности непрерывного излучения и исследование причин его превышения над мощностью рекомбинационного излучения.

Схема измерений. Для исследований использовали монохроматор МДР-206, выполненный по оптической схеме Эберта – Фасти, который обладает необходимой разрешающей способностью и позволяет исследовать не только отдельно стоящие линии и молекулярные полосы, но и континуум. Излучение лампы фокусировалось на входной щели монохроматора.

Калибровка монохроматора, регистрация и шивка участков спектра в видимой и ультрафиолетовой областях, а также их распознавание осуществляли с помощью специализированного программного обеспечения [2]. Обзорный спектр лампы ДДС-30 показан на рис. 1. Видно, что в диапазоне длин волн 300...450 нм имеется существенное повышение интенсивности континуума, а в области больших длин волн наблюдаются молекулярные полосы и атомар-

ные линии дейтерия и неона. Для определения спектральной чувствительности и абсолютной тарировки оптической системы использовали образцовую лампу ТРУ1100-2350. Анализ зарегистрированного спектра выполняли в среде MATLAB [3, 4].

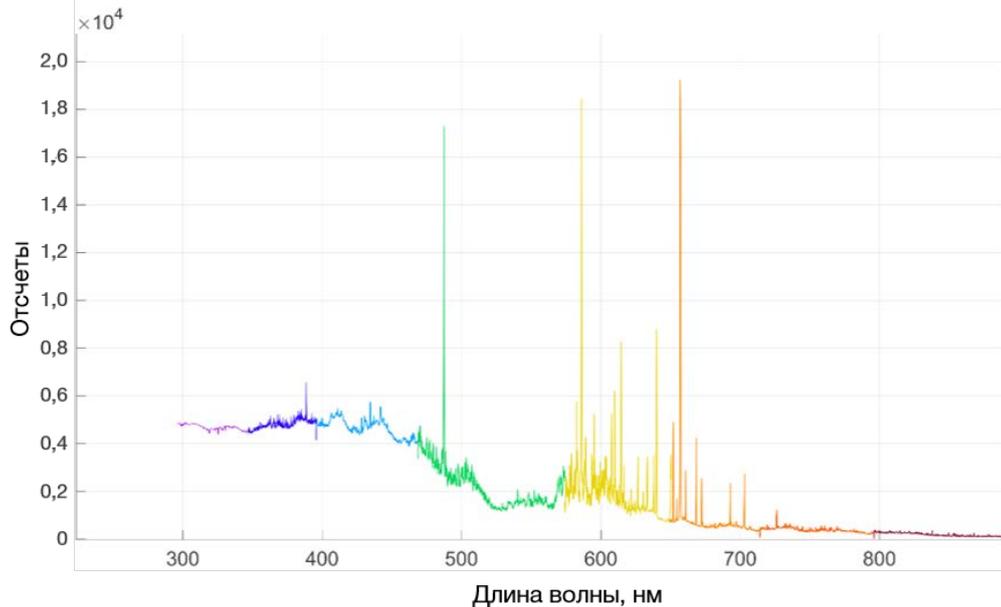


Рис. 1. Обзорный спектр лампы ДДС-30

Проведенный анализ спектра излучения лампы показал, что в нем присутствуют атомарные линии серии Бальмера DI , линии NeI , а также полосы молекул D_2 . В окрестности границы ультрафиолетовой и фиолетовой областей спектра ярко выражен континуум излучения.

Для оценки температуры плазмы применен графический метод [5], при котором в соответствии с методикой Орнштейна [6] используются несколько пар линий. Для этого результаты измерений были представлены в виде графика зависимости $\lg \frac{J_{mn}\lambda_{mn}}{A_{mn}g_m}$ от энергии верхнего уровня E_m (рис. 2). Такой способ позволяет отделить линии, интенсивности которых явно искажены из-за самопоглощения, вырождения или наложения посторонних линий. Температура электронов определяется по тангенсу угла наклона этого полулогарифмического графика.

В результате обработки относительных интенсивностей спектральных линий и проверки этих линий по критериям применимости графического метода выявлены 18 пар линий, которые с достаточной точностью ложатся на бальмановскую прямую и позволяют оценить температуру.

На графике (см. рис. 2) синими точками обозначены пары линий неона ($Ne I$), а оранжевыми — пары линий дейтерия, подходящие по вышеуказанным критериям отбора. Как видно, все они концентрируются вблизи прямой линии, тан-

генс угла наклона которой определяет среднюю электронную температуру плазмы [5]. Эта «линия тренда» построена в среде MATLAB с использованием метода наименьших квадратов. Полученная таким методом температура электронов составила около 15000 К.

На графике (см. рис. 2) синими точками обозначены пары линий неона (Ne I), а оранжевыми — пары линий дейтерия, подходящие по вышеуказанным критериям отбора. Как видно, все они концентрируются вблизи прямой линии, тангенс угла наклона которой определяет среднюю электронную температуру плазмы [5]. Эта «линия тренда» построена в среде MATLAB с использованием метода наименьших квадратов. Полученная таким методом температура электронов составила около 15000 К.

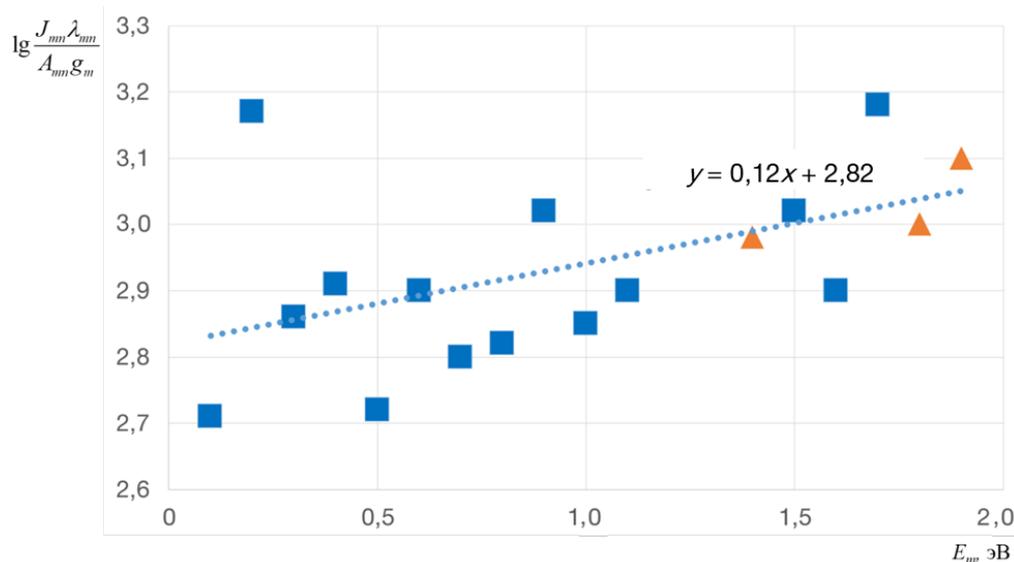


Рис. 2. Зависимость $\lg \frac{J_{mn}\lambda_{mn}}{A_{mn}g_m}$ от E_m

Для оценки концентрации заряженных частиц плазмы разряда использованы два независимых метода. Согласно методу Инглиса – Теллера эта плотность может быть оценена по номеру m последней наблюдаемой линии серии Бальмера [5] с помощью формулы

$$\lg N_e = 23,64 - 7,5 \lg m.$$

С учетом последней наблюдаемой в спектре линии H_γ и погрешности около 100 % концентрация заряженных частиц составила $N_e = (0,2 \dots 0,5) \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$. При этом следует отметить, что это оценка сверху, так как достаточно широкая аппаратная функция может не позволить зарегистрировать более коротковолновые линии дейтерия.

Второй метод определения концентрации был связан с использованием уравнения Саха. По найденной электронной температуре и давлению в лампе

в предположении равенства температур тяжелых частиц температуре окружающей среды ее значение составило около $1 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$. С учетом оговоренной выше погрешности применения метода Инглиса – Теллера это продемонстрировало удовлетворительное согласие величин концентрации, найденных двумя способами.

Результаты расчетов. Для сравнительного анализа интенсивностей излучения в исследуемой области выполнен расчет мощности рекомбинационного излучения. Это излучение сопровождается двухчастичный процесс рекомбинации, когда в результате столкновения электрона с ионом образуется нейтральный атом. В результате рекомбинационных процессов формируется рекомбинационное излучение со спектром в виде широких полос.

Зная температуру и плотность плазмы, можно расчетным путем оценить мощность рекомбинационного излучения [7] и сравнить ее со значением, полученным экспериментально. Мощность рекомбинационного излучения атомарной водородной плазмы на частоте ν в условиях, когда имеют место больцмановское распределение частиц по уровням атома и максвелловское распределение электронов по скоростям с температурой T_e , а заселенность уровня N_n связана с концентрацией электронов формулой Саха, определяется согласно соотношению

$$\epsilon_\nu = c U_{\nu p} k_\nu [1 - \exp(-h\nu / kT_e)],$$

где ϵ_ν — мощность излучения; c — скорость света; $U_{\nu p}$ — функция Планка; k_ν — коэффициент поглощения.

Коэффициент поглощения

$$k_\nu = \sum_n \sigma_n N_n,$$

где σ_n — сечение фотоионизации с уровня атома водорода с главным квантовым числом n . Суммирование выполняется по всем уровням, с которых возможна фотоионизация на частоте ν .

Выражение для сечения фотоионизации по Крамерсу согласно [8] имело вид

$$\sigma_\nu = \frac{64\pi}{3\sqrt{3}} \alpha \left(\frac{Ry}{h\nu} \right)^3 \frac{a_0^2}{n^5} = 7,9 \cdot 10^{-18} n \left(\frac{\nu_p}{\nu} \right)^3.$$

Здесь α — постоянная тонкой структуры; Ry — потенциал ионизации атома; ν_p — пороговая частота излучения, при которой возможна фотоионизация с уровня n .

Результаты расчета спектрального распределения мощности рекомбинационного излучения в широком диапазоне длин волн 100...1000 нм представлены на рис. 3.

Скачок на длине волны 367 нм соответствует включению в излучательный процесс второго уровня с энергией связи 3,38 эВ. На длине волны 91,7 нм вклю-

чается основной уровень и мощность излучения из-за резкого повышения населенности уровня вырастает почти на 4 порядка (на рис. 3 это не показано).

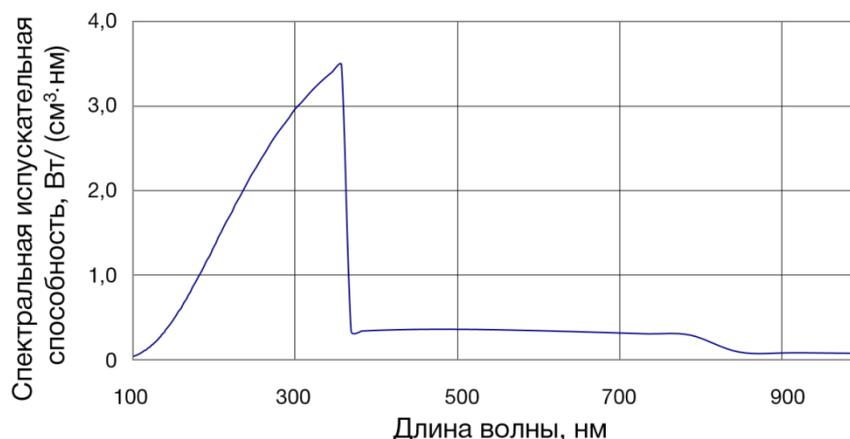


Рис. 3. Зависимость спектральной испускательной способности от длины волны

Мощность излучения в диапазоне 300...450 нм при концентрации электронов $N_e = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ составляет: при $T_e = 13000 \text{ К}$ – 285 Вт/см³, при $T_e = 15000 \text{ К}$ – 248 Вт/см³, а при $T_e = 17000 \text{ К}$ — 220 Вт/см³. Уменьшение мощности с ростом электронной температуры связано с характером поведения заселенности уровня при фиксированном значении концентрации электронов:
$$N_n \propto \frac{\exp(\epsilon_n / kT_e)}{T_e^{3/2}}.$$

По результатам регистрации спектра и абсолютной тарировки оптической системы можно провести расчет энергии, которую излучает разряд. Используя интегрирование методом трапеций в интересующем нас диапазоне (300...450 нм), получим $P_{\text{рек}} = 440 \text{ Вт/см}^3$, что почти вдвое больше, чем найденное теоретически значение рекомбинационного континуума, и свидетельствует об аномальном уровне излучения.

Анализ немногочисленных литературных источников (см., например, [9]) показывает, что это связано с влиянием добавок инертного газа. Одна из гипотез связана с передачей возбуждения от атомов газа молекулам и последующей радиационной диссоциации молекул. В частности, в упомянутой работе [9] исследуется передача возбуждения от атомов Ar^+ молекулам H_2 . В нашем случае можно предположить передачу возбуждения от атомов Ne^+ молекулам D_2 . Схожая ситуация аномальной интенсивности излучения в той же области наблюдалась при добавлении в дейтерий аргона, необходимого для предотвращения срывов в токамаке [10].

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение природы этого аномального явления. Предполагается, что результаты этого исследования должны привести к более точной оценке параметров плазмы как для лампы ДДС-30, так и при диагностике дейтериевой плазмы в токамаке.

Заключение. В результате экспериментально-расчетных исследований показано, что наблюдаемая интенсивность континуума в диапазоне 350...400 нм является аномальной и почти вдвое превышает расчетное значение для рекомбинационного континуума. Это связано, по-видимому, с наличием в источнике плазмы помимо дейтерия другого газа — неона, который существенно влияет на протекание процессов возбуждения и формирования излучения. Исследование этого эффекта будет продолжено.

Литература

- [1] Лампа дейтериевая спектральная ДДС-30 (лд2-д). *medrk.ru: веб-сайт*. URL: <http://www.medrk.ru/shop/lampy-medicinskie/lampy-prochie/id-10060> (дата обращения: 17.05.2019).
- [2] Градов В.М., Зимин А.М., Кривицкий С.Е. и др. Автоматизированный спектрометрический комплекс для диагностики плазмы магнетронного разряда. *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2009, № 1, с. 64–71.
- [3] Сизиков В.С. Обратные прикладные задачи и MatLab. СПб., Лань, 2011.
- [4] MatLab. Руководство для начинающих. Российское Хемометрическое Общество. URL: <http://rscs.chemometrics.ru/Tutorials/matlab.htm> (дата обращения: 17.05.2019).
- [5] Колесников В.Н. Спектроскопическая диагностика плазмы. М., МИФИ, 2007.
- [6] Солоухин Р.И., ред. Оптика и атомная физика. Новосибирск, Наука, 1976.
- [7] Биберман Л.М. Норман Г.Э. Непрерывные спектры атомарных газов и плазмы. *УФН*, 1967, т. 91, № 2, с. 193–215. DOI: 10.3367/UFNr.0091.196702b.0193 URL: <https://ufn.ru/ru/articles/1967/2/b/>
- [8] Собельман И.И. Введение в теорию атомных спектров. М., Физматгиз, 1963.
- [9] Lavrov V.P., Melnikov A.S. UV continuum emission and diagnostics of hydrogen-containing non-equilibrium plasmas. *Phys. Rev. E*, 1999, vol. 59, no. 3, pp. 3526–3543. DOI: 10.1103/PhysRevE.59.3526 URL: <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.59.3526>
- [10] Дремин М.М., Капралов В.Г., Кислов А.Я. и др. Влияние напуска благородных газов на срыв разряда в токамаке Т-10. *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2012, № 4, с. 58–70.

Золотарев Павел Владимирович — студент кафедры «Плазменные энергетические установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Зимин Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Плазменные энергетические установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

STUDY OF THE RADIATIVE CHARACTERISTICS OF THE DEUTERIUM LAMP DDS-30

P.V. Zolotarev

pavelzolotaryov@ya.ru

SPIN-code: 4508-2420

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

In spectral studies, a DDS-30 lamp with a deuterium-neon filling is often used as a source, which gives a continuous emission spectrum in the violet and ultraviolet range. Using the MDR-206 monochromator, plasma emission spectra were recorded and it was shown that in the wavelength range 300...450 nm a high intensity of continuous radiation is observed. A study of the radiation characteristics of the lamp was carried out, the plasma parameters have been experimentally determined, and the excess of the power registered in this region over the calculated radiation associated with recombination radiation has been shown. The observed anomaly may be associated, apparently, with the transfer of excitation from neon atoms to deuterium molecules.

Keywords

Deuterium plasma, DDS-30 lamp, MDR-206 monochromator, recombination radiation, anomalous continuum, graphical method for determining temperature, determination of plasma density, spectral emissivity

Received 04.06.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Lampa deyerievaya spektral'naya DDS-30 (ld2-d) [DDS-30 (ld2-d) deuterium spectral lamp]. *medrk.ru: website* (in Russ.). URL: <http://www.medrk.ru/shop/lampy-meditsinskie/lampy-prochie/id-10060> (accessed: 17.05.2019).
- [2] Gradov V.M., Zimin A.M., Krivitskiy S.E., et al. Automated spectrometric complex for diagnostics of magnetron discharge plasma. *VANT. Ser. Termoyadernyy sintez* [Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion], 2009, no. 1, pp. 64–71 (in Russ.).
- [3] Sizikov V.S. Obratnye prikladnye zadachi i MatLab [Inverse applied problems and MatLab]. Sankt-Petesburg, Lan' Publ., 2011 (in Russ.).
- [4] MatLab. Rukovodstvo dlya nachinayushchikh. Rossiyskoe Khemometricheskoe Obshchestvo. URL: <http://rsc.chemometrics.ru/Tutorials/matlab.htm> (accessed: 17.05.2019).
- [5] Kolesnikov V.N. Spektroskopicheskaya diagnostika plazmy [Spectroscopic diagnostics of plasma]. Moscow, MEPhI Publ., 2007 (in Russ.).
- [6] Soloukhin R.I., ed. Optika i atomnaya fizika [Optics and atomic physics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1976 (in Russ.).
- [7] Biberman L.M. Norman G.E. Continuous spectra of atomic gases and plasma. *UFN*, 1967, vol. 91, no. 2, pp. 193–215. DOI: 10.3367/UFNr.0091.196702b.0193 URL: <https://ufn.ru/ru/articles/1967/2/b/> (in Russ.). (Eng. version: *Sov. Phys. Usp.*, 1967, no. 10, pp. 52–90. DOI: 10.1070/PU1967v010n01ABEH003199 URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/PU1967v010n01ABEH003199>)
- [8] Sobel'man I.I. Vvedenie v teoriyu atomnykh spektrov [Introduction into atomic spectrum theory]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963 (in Russ.).

- [9] Lavrov B.P., Melnikov A.S. UV continuum emission and diagnostics of hydrogen-containing non-equilibrium plasmas. *Phys. Rev. E*, 1999, vol. 59, no. 3, pp. 3526–3543.
DOI: 10.1103/PhysRevE.59.3526
URL: <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.59.3526>
- [10] Dremin M.M., Kapralov V.G., Kislov A.Ya., et al. Effect of noble gas injection on discharge disruption in T-10 tokamak. *VANT. Ser. Termoyadernyy sintez* [Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion]. 2012, no. 4, pp. 58–70 (in Russ.).

Zolotarev P.V. — Student, Department of Plasma and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Zimin A.M., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Plasma and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.