

УДК 533.9.082.76

Оптическая спектральная и зондовая диагностика тлеющего разряда

Козырев Александр Валентинович

kozykryl@gmail.com

SPIN-код: 9512-5868

Докукин Михаил Юрьевич

dmu252@yandex.ru

SPIN-код: 2863-1114

Смирнов Евгений Антонович

zheka.xyz@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Представлены результаты комплексного экспериментального исследования параметров низкотемпературной плазмы тлеющего разряда в различных средах (H_2 , Hg, He, Ne, Na) методом оптической эмиссионной спектроскопии. Метод основан на анализе относительной интенсивности спектральных линий атомов с использованием статистики Больцмана. Для каждого газа были определены температуры электронов, находящиеся в диапазоне от 3300 до 11500 К в зависимости от используемой пары спектральных линий. Проведен анализ факторов, влияющих на точность измерений, и условия ЛТР в плазме. Проведено сравнение результатов, полученных методом оптической диагностики и зондовой диагностики. Полученные результаты демонстрируют хорошую сходимость с теоретическими ожиданиями и данными других исследований.

Ключевые слова: оптическая эмиссионная спектроскопия, тлеющий разряд, низкотемпературная плазма, статистика Больцмана, температура электронов, энергетические уровни, механизмы уширения линий, локальное термодинамическое равновесие

Optical spectral and probe diagnostics of glow discharge

Kozyrev Alexander Valentinovich

kozykryl@gmail.com

SPIN-code: 9512-5868

Dokukin Mikhail Yurievich

dmu252@yandex.ru

SPIN-code: 2863-1114

Smirnov Evgeny Antonovich

zheka.xyz@gmail.com

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The paper presents the results of a comprehensive experimental study of the parameters of low-temperature glow discharge plasma in various media (H_2 , Hg, He, Ne, Na) using optical emission spectroscopy. The method is based on the analysis of the relative intensity of atomic spectral lines using Boltzmann statistics. For each gas, the electron temperatures were determined to be in the range of 3300 K to 11500 K, depending on the pair of spectral lines used. The factors affecting the measurement accuracy and the LTR conditions in the plasma were analyzed. The results obtained by the optical diagnostics and the probe diagnostics methods were compared. The obtained results demonstrate good convergence with theoretical expectations and data from other studies.

Keywords: *optical emission spectroscopy, glow discharge, low-temperature plasma, Boltzmann formula, electron temperature, energy levels, line broadening mechanisms, local thermodynamic equilibrium*

Введение. Тлеющий разряд представляет собой классическую форму низкотемпературной плазмы, самоподдерживающийся разряд, возникающий при низких давлениях (обычно 0,01–10 мм рт. ст.) и умеренных напряжениях [1]. Среди разнообразных методов исследования плазмы (зондовые методы, микроволновая диагностика, лазерная спектроскопия) свое место занимает оптическая эмиссионная спектроскопия (ОЭС) [2, 3]. Кроме того, метод обеспечивает высокое пространственное и временное разрешение. OES позволяет определять такие критически важные параметры тлеющего разряда, как температура электронов (T_n), концентрация заряженных и возбужденных частиц (n_n, n_i, n_k). Данная работа посвящена практическому применению этого мощного диагностического инструмента для исследования разряда в различных газах (H_2, Hg, He, Ne, Na) и последующему анализу полученных результатов [4, 5].

Материалы и методы. В основе оптической эмиссионной спектроскопии лежит анализ излучения, возникающего при спонтанных переходах возбужденных атомов, ионов или молекул на более низкие энергетические уровни. Набор этих частот образует линейчатый спектр, уникальный для каждого химического элемента, что позволяет проводить качественный и количественный анализ состава плазмы [6]. Количественной мерой перехода является интенсивность спектральной линии I_{mi} для перехода с верхнего уровня e на нижний уровень i , которая определяется выражением [2]:

$$I_{mi} = \frac{1}{4\pi} n_n A_{mi} h\nu_{mi} L, \quad (1)$$

где n_n — плотность числа частиц на верхнем уровне e ; A_{mi} — коэффициент Эйнштейна; ν_{mi} — частота перехода; L — толщина излучающего слоя плазмы вдоль линии наблюдения. Ключевым для диагностики является распределение частиц по энергетическим уровням. В условиях локального термодинамического равновесия (ЛТР) это распределение описывается статистикой Больцмана:

$$\frac{n_n}{n_0} = \left(\frac{g_n}{g_0}\right) e^{-\left(\frac{E_n}{kT_n}\right)}, \quad (2)$$

где n_0 — плотность числа частиц в основном состоянии; g_n, g_0 — статистические веса уровней (вырождение); E_n — энергия возбужденного уровня относительно основного; k — постоянная Больцмана; T_n — температура электронов, которая в условиях ЛТР равна температуре возбуждения. Из (1) и (2) следует выражение для электронной температуры

$$T_e = \frac{E_2 - E_1}{k \cdot \ln\left(\frac{I_2 g_1 \lambda_2 A_1}{I_1 g_2 \lambda_1 A_2}\right)}, \quad (3)$$

являющееся основой метода по относительной интенсивности спектральных линий (ОИЛ).

Экспериментальная установка. Экспериментальные исследования аномального He-Ne разряда проводились на специализированной лабораторной установке «Плазма-2» с плечом оптической диагностики включающем спектрометр ИнСпектр, предназначенным для наблюдения, качественного и количественного анализа спектров в видимой и ближней УФ-областях (рис. 1).

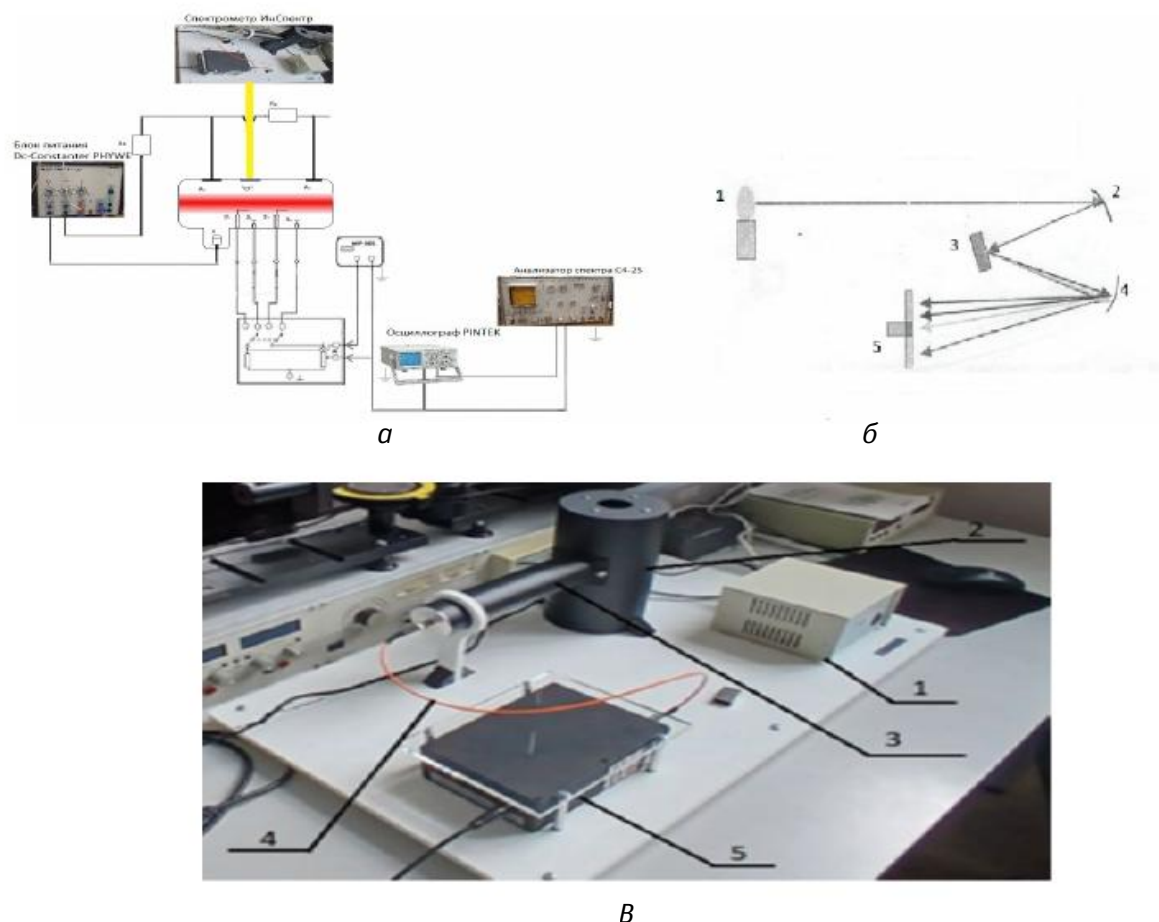


Рис. 1. а — схема лабораторной установки «Плазма-2» для исследования спектра аномального тлеющего разряда; б — оптическая схема спектрометра: 1 — источник света; 2 — зеркало; 3 — отражательная дифракционная решетка; 4 — зеркало; 5 — ПЗС-матрица; в — оптическое плечо установки: 1 — источник питания; 2 — газоразрядная лампа; 3 — коллиматор; 4 — оптоволокно; 5 — спектрометр «ИнСпектр»

В качестве источников плазмы использовались серийные газоразрядные лампы низкого давления, наполненные H_2 , Hg, He, Ne, Na. При использовании формулы (3) выбирались пары спектральных линий, для которых известны: энергии уровней E , статистические веса g и вероятности переходов A_{mi} [7, 8].

Результаты. Спектральные линии Hg использовались для калибровки спектрометра (рис. 2), с помощью которых определялись длина волны и интенсивность от 4 до 10 наиболее интенсивных спектральных линий для других газоразрядных ламп. Эти результаты позволяют оценить разброс и достоверность получаемых значений (табл. 1, 2).

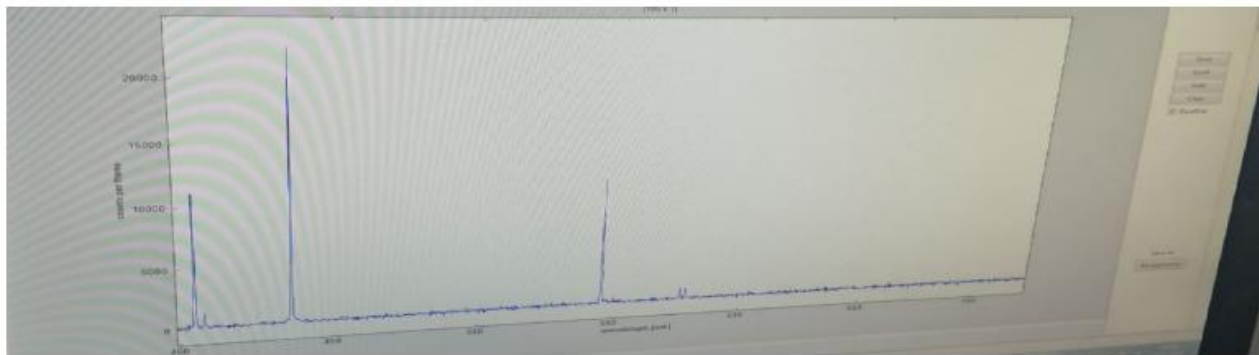


Рис. 2. Калибровка спектрографа ИнСпектр на основе Hg-лампы

Таблица 1

Расчет температуры плазмы по парам линий ртути (Hg) [3, 4]

Пары линий (нм)	$E_2 - E_1$ (эВ)	$\ln \left(\frac{I_2 g_1 \lambda_2 A_1}{I_1 g_2 \lambda_1 A_2} \right)$	T_e (К)
365,0 / 546,1	0,00	-0,86	—

Таблица 2

Расчет температуры для гелий-неоновой плазмы [7, 8]

Элемент	Пары линий (нм)	$E_2 - E_1$ (эВ)	T_e (К)
He	447,1 / 587,6	0,30	4200
	501,6 / 587,6	0,67	4100
Ne	607,4 / 640,2	0,16	3600
	585,2 / 640,2	0,14	3700

Обсуждение полученных результатов. Анализ результатов, представленных в табл. 1, показывает, что температура электронов, рассчитанная по разным парам линий одного и того же элемента, может существенно отличаться. Этот разброс является ожидаемым и обусловлен рядом факторов:

- основным допущением метода является наличие (ЛТР);
- значительный вклад вносит погрешность измерения относительных интенсивностей линий;
- важную роль играет точность справочных данных, особенно вероятностей переходов A_{ki} ;
- на форму и измеряемую интенсивность линии влияют механизмы уширения.

В работе [9, 10] приведены результаты определения локальных параметров He-Ne плазмы аномального тлеющего разряда методом двойных зондов (рис. 3).

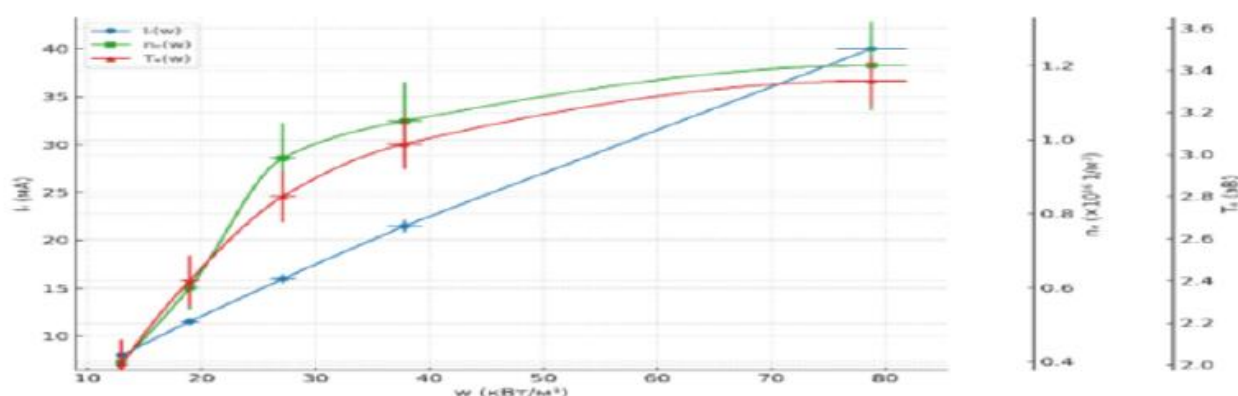


Рис. 3. Зависимость тока разряда I_d , концентрации электронов n_e и температуры T_e от удельной мощности w аномального He-Ne разряда w

Результаты исследований аномального He-Ne тлеющего разряда установки «Плазма-2» имеет T_e значительно более высокого значения, чем температура в спектральных лампах отдельно для He и Ne, что требует отдельного анализа. Для повышения точности T_e необходимо: 1) использовать пары линий с максимально возможной разностью энергий верхних уровней, но при этом схожей интенсивностью и проводить усреднение результата; 2) применять методы объективного измерения интенсивности.

Заключение. Экспериментально определенные электронные температуры на различных спектрах атомов Hg, H₂, He, Ne, Na повышают достоверность измерений электронной температуры в интервале 3500–4200 К тлеющего разряда низкого давления. Проведен детальный анализ факторов, влияющих на точность метода относительной интенсивности: условия ЛТР, точность справочных данных $A_{ki} g_k$ и погрешность измерений. Показано, что наиболее согласованные результаты достигаются при использовании нескольких линий, принадлежащих одной спектральной серии и имеющих схожие интенсивности. Выполненная работа является необходимым этапом торировки оптического плеча установки с спектрометром ИнСпектр для его использования в исследовании плазменного образования аномального стратифицированного He-Ne тлеющего разряда установки «Плазма-2». Из исследования вытекает, что для дальнейшего повышения точности и достоверности результатов целесообразно использовать современные методы регистрации спектров с помощью цифровых ПЗС-детекторов и проводить измерения с учетом реальной формы контуров спектральных линий в режиме реального времени. Два независимых методов: зондовой диагностики и спектральной диагностики дают согласованные результаты.

Список источников

- [1] Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. Москва, Наука, 2009, 794 с.
- [2] Лохте-Хольтгревена В., ред. *Методы исследования плазмы: Спектроскопия, лазеры, зонды*. Москва, Мир, 1971, 552 с.

- [3] Макуиртер Р. *Спектральные интенсивности. Диагностика плазмы*. Москва, Мир, 1967, с. 165–217.
- [4] Смирнов Б.М. *Физика слабоионизованного газа*. Москва, Наука, 1972, 456 с.
- [5] Голубовский Ю.Б., Некучаев В.О., Скобло А.Ю. Прогресс в исследовании страт в инертных газах. *Журнал технической физики*, 2014, т. 84, № 12, с. 50–62.
- [6] Грим Г. *Уширение спектральных линий в плазме*. Москва, Мир, 1977, 492 с.
- [7] Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. *Техника и практика спектроскопии*. Москва, Наука, 1976, 392 с.
- [8] *Atomic Spectra Database*. URL: <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database> (accessed 20.08.2025).
- [9] Козырев А.В., Шibaева А.Д. Лабораторная работа «Зондовый метод диагностики плазмы». *Физическое образование в вузах*, 2021, т. 27, № 1, с. 41–48.
- [10] Козырев А.В., Баршак Д.А. Шаровая локализация анодного электронного потока тлеющего разряда. *Будущее машиностроения России. XVIII Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (с междунар. уч.): сб. докл.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026, т. 2, с. 613–619.