

УДК 537.525:537.63

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В. А. Пинаев, И. М. Уланов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

Статья получена 2 декабря 2013 г.

**Аннотация.** В работе экспериментально измерена спектральная светимость непрерывного спектра в области отрицательного свечения тлеющего разряда. Показано, что при низком давлении и малой степени ионизации  $\delta \sim 10^{-6}$  наибольший вклад в светимость непрерывного спектра вносит тормозное излучение при рассеянии электрона на нейтральной частице. Было обнаружено, что измеренная величина непрерывного спектра больше расчетной в  $10^2-10^4$  раз, причем наибольшее расхождение наблюдается в конце области отрицательного свечения.

**Ключевые слова:** тормозное излучение, непрерывный спектр излучения, тлеющий разряд

**Abstract:** The paper contains experimental results for the intensity of the continuous spectrum in the negative glow region of a glow discharge. It is shown that at low pressures and low degree of ionization  $\delta \sim 10^{-6}$  the electron scattering on neutral particles makes the main contribution to the intensity of the continuous spectrum. It was found that the measured value of the intensity of the continuous spectrum exceeded the calculated value  $10^2-10^4$  times, with the largest discrepancy observed at the end of the negative glow region.

**Key words:** bremsstrahlung emission, continuum spectrum, glow discharge

### 1. Введение

Применение тлеющего разряда в различных технологических процессах (обработка и модификация поверхности, плазмохимия) в лазерной технике, в качестве среды для исследований (пылевая плазма), в технологиях создания

источников света (лампы дневного света, ультрафиолетовые лампы) делает актуальным его исследование в широкой области фундаментальных и прикладных задач физики низкотемпературной плазмы.

Исследование излучения непрерывного спектра тлеющего разряда выполнено в области положительного столба при средних давлениях плазмообразующего газа ( $p = 1-100$  мм рт. ст.) [1-3]. С понижением давления длина области положительного столба уменьшается и отрицательное свечение заполняет практически весь объём разрядной камеры. Отсутствие работ рассматривающих излучение непрерывного спектра в данной области связано с тем, что интенсивность его излучения чрезвычайно мала. Целью данной работы являлось измерение абсолютной величины спектральных компонент излучения тлеющего разряда низкого давления в области отрицательного свечения, анализ влияния элементарных процессов в тлеющем разряде на формирование непрерывного спектра.

## **2. Экспериментальная установка и методы измерений**

Тлеющий разряд создавался в цилиндрической кварцевой трубке диаметром 42 мм и длиной 50 см (см. рис. 1). Для определения температуры и плотности электронов в разрядную камеру были введены зонды, способные перемещаться по длине разряда. Сигнал с зондов подавался через АЦП на компьютер, где с помощью специально разработанного программного обеспечения осуществлялся расчет температуры и плотности электронов по формулам метода двойного зонда [4]. Точность измерений температуры электронов составляла 20%. Точность измерения плотности электронов - порядок величины. Оптический тракт был проградуирован с помощью сертифицированной ленточной вольфрамовой лампы, что позволило проводить спектральные измерения в абсолютных единицах ( $\text{эрг см}^{-1} \text{с}^{-1}$ ). Излучение разряда фокусировалось на щель монохроматора МДР-23 и записывалось через АЦП на компьютер. Точность спектральных измерений не превышала 15%.

Более подробное описание экспериментальной установки и методик измерений приведено в работе [5].

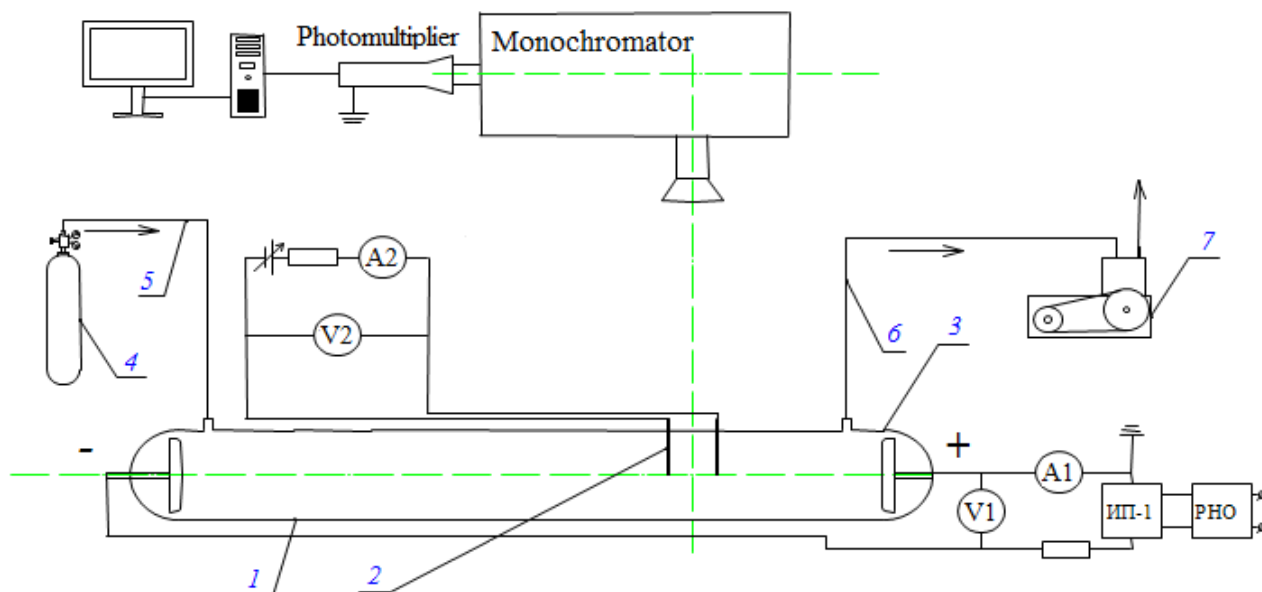


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – разрядная камера, 2 – зонды, 3 – электроды, 4 – газовый баллон, 5 – игольчатый вентиль, 6 – газовые линии, 7 – форвакуумный насос.

### 3. Непрерывный спектр излучения тлеющего разряда

Из всего многообразия процессов взаимодействия электронов с атомами и молекулами, способных приводить к излучению электромагнитного кванта в непрерывный спектр (фоторекомбинация, фотоприлипание, тормозное излучение на ионах и нейтральных частицах), основным процессом, при данных условиях тлеющего разряда, является тормозное излучения электрона на нейтральных частицах [6]:



Оценки интенсивности излучения других процессов показывают [7], что в исследуемой плазме тлеющего разряда, где плотность электронов лежит в интервале  $n_e \sim 10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$  (степень ионизации составляет  $\delta \sim 10^{-7} - 10^{-5}$ ), их интенсивность на три и более порядка меньше и может не учитываться.

Согласно выводам классической электродинамики, энергия  $dQ_\lambda$ , излучаемая одним электроном в результате рассеяния на тяжёлой нейтральной

частице в спектральный диапазон  $\lambda, \lambda+d\lambda$  может быть записана в следующем виде [7]:

$$dQ_\lambda = \frac{8}{3} \frac{e^2}{c^2} v^2 \nu_m(v) \frac{d\lambda}{\lambda^2} \text{ эрг} \cdot \text{см}^2/\text{с}, \quad (1)$$

где  $v$  - скорость электрона,  $\nu_m$  - эффективная частота столкновения электрона с нейтральной частицей. Усредняя (1), считая, что функции распределения электронов имеет максвелловский вид, получим общее излучение одного  $\text{см}^3$  плазмы  $J_\lambda$  в спектральный диапазон  $\lambda, \lambda+d\lambda$ :

$$J_\lambda d\lambda = \frac{32\pi}{3} \frac{e^2}{c^2} \left( \frac{m}{2\pi kT_e} \right)^{3/2} n_e \int_{v_{\min}}^{\infty} v^4 \nu_m(v) e^{-\frac{mv^2}{2kT_e}} dv \frac{d\lambda}{\lambda^2} \text{ эрг}/(\text{см} \cdot \text{с}), \quad (2)$$

где  $v_{\min} = (2hc/(m\lambda))^{1/2}$  - наименьшая скорость электрона, при которой он способен излучить световой квант с энергией  $hc/\lambda$ .

Точный квантово-механический расчёт спектральной плотности излучения электронов в результате рассеяния на нейтральных частицах  $J_\lambda^{\text{brems}}$  приводит к следующему выражению [3]:

$$J_\lambda^{\text{brems}} d\lambda = 3.1 \cdot 10^{-2} \frac{\hbar}{m^{3/2} c} n_e N (kT_e)^{-3/2} \int_{\hbar\omega}^{\infty} \sqrt{\varepsilon(\varepsilon - \frac{hc}{\lambda})} \left[ \varepsilon \sigma_{\text{tr}}(\varepsilon - \frac{hc}{\lambda}) + \right. \\ \left. + (\varepsilon - \frac{hc}{\lambda}) \sigma_{\text{tr}}(\varepsilon) \right] e^{-\frac{\varepsilon}{kT_e}} d\varepsilon \frac{d\lambda}{\lambda^2} \text{ эрг}/(\text{см} \cdot \text{с}), \quad (3)$$

где  $N$  - концентрация атомов,  $T_e$  - электронная температура,  $\varepsilon = mv^2/2$  - энергия электрона,  $\sigma_{\text{tr}}(\varepsilon)$  - транспортное сечение упругих столкновений.

Из формул (2), (3) видно, что интенсивность тормозного излучения при заданном давлении зависит от температуры и концентрации (в общем случае - функции распределения) электронов. Спектральный состав тормозного излучения лежит в интервале от нижней границы пропускания электромагнитных волн в плазме ( $\sim$  ГГц) вплоть до частот при которых энергия светового кванта совпадает с максимальной энергией электронов в плазме.

Измеренная спектральная плотность непрерывного спектра сравнивалась с расчетом по формулам (2) и (3).

#### 4. Экспериментальные результаты

Для нахождения распределений температуры и плотности электронов по длине разряда были выполнены зондовые измерения для двух значений давления  $p$  20 и 70 Па и падения напряжения на разряде  $U_d$  составляющего 2350 В и 1400 В, соответственно (рис. 2, 3). Ток разряда в обоих случаях равнялся  $I_d = 10$  мА.

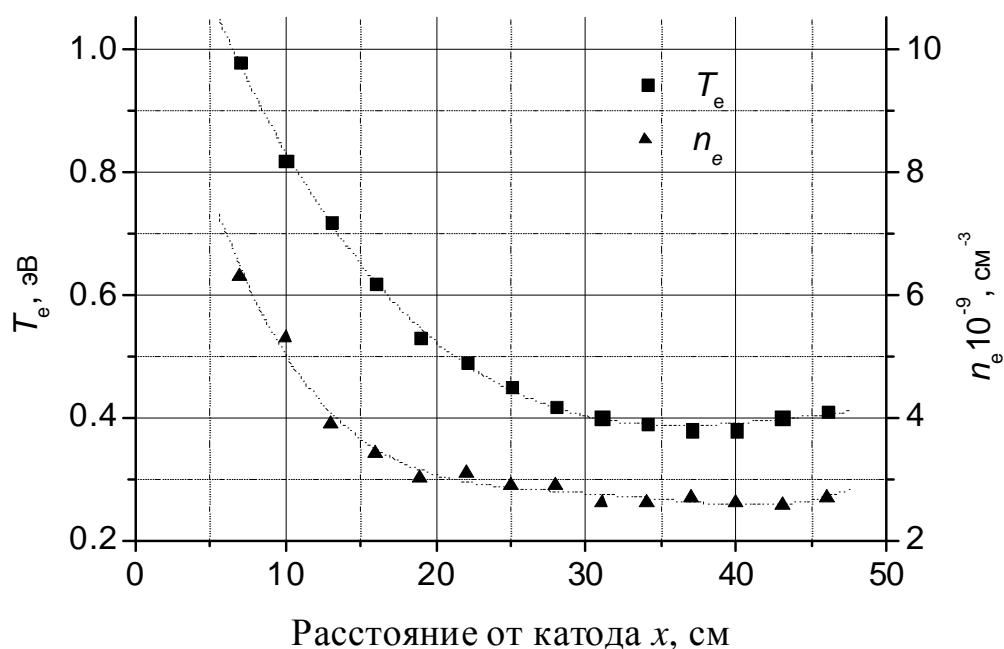


Рис. 2. Распределение температуры  $T_e$  и плотности  $n_e$  электронов по длине разряда. Не,  $p = 20$  Па,  $I_d = 10$  мА,  $U_d = 2350$  В.

По мере удаления от катода отсутствие электрического поля в области отрицательного свечения тлеющего разряда приводит к падению температуры основной группы электронов  $T_e$  за счёт амбиполярной диффузии на стенку и различных соударений с нейтралами (рис. 2, 3). Релаксация группы быстрых электронов по длине разряда приводит к уменьшению актов ионизации, и следовательно, скорости рождения новых заряженных частиц. В результате, плотность заряженных частиц падает. Для дальнейшего поддержания баланса

заряженных частиц продольное электрическое поле увеличивается и формируется область положительного столба рис. 3 ( $x > 34$  см).

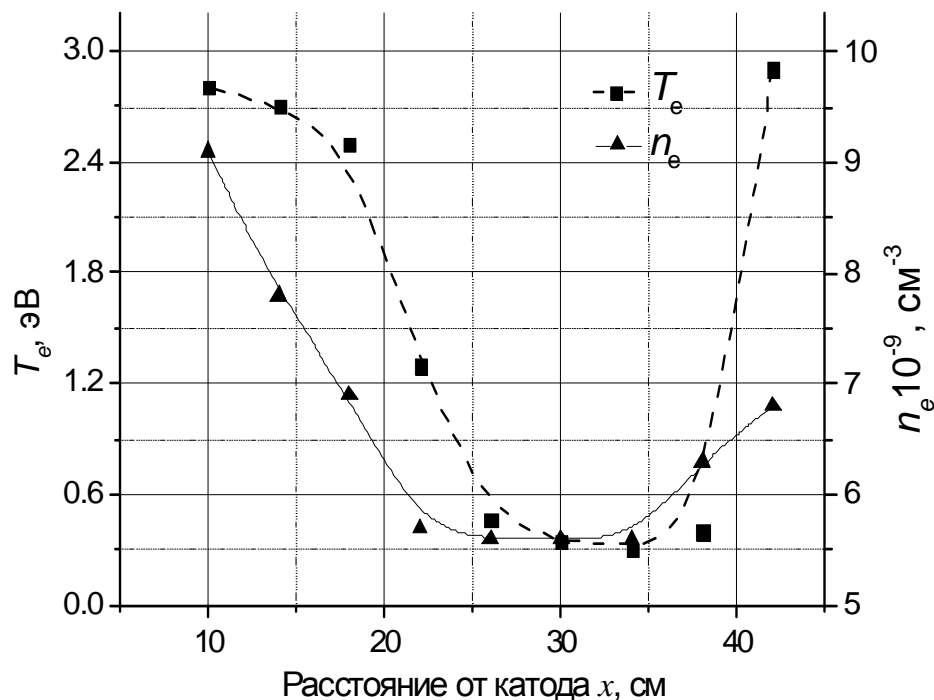


Рис. 3. Распределение температуры  $T_e$  и плотности  $n_e$  электронов по длине разряда. He,  $p = 70$  Па,  $I_d = 10$  мА,  $U_d = 1400$  В.

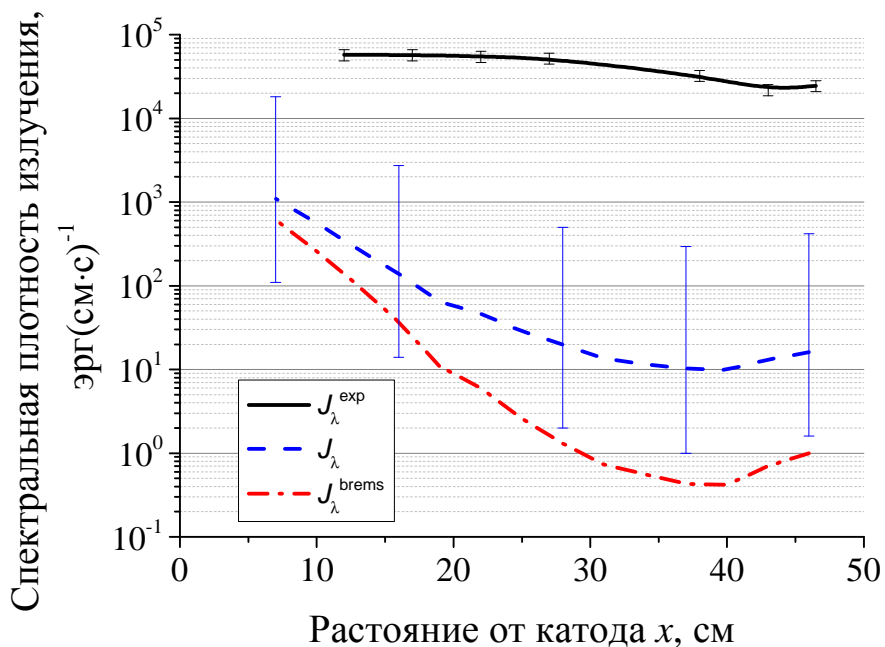


Рис. 4. Спектральная плотность излучения разряда  $J_\lambda^{\text{exp}}$  и рассеяния электронов на нейтральных частицах  $J_\lambda$ ,  $J_\lambda^{\text{brems}}$  при  $\lambda = 532$  нм от продольной координаты  $x$ . He,  $p = 20$  Па,  $I_d = 10$  мА,  $U_d = 2350$  В.

Результаты измерения  $J_\lambda^{\text{exp}}$  и расчёта  $J_\lambda$ ,  $J_\lambda^{\text{brems}}$  спектральной плотности излучения в непрерывном спектре в зависимости от продольной координаты  $x$  представлены на рис. 4. Расчёт выполнен по результатам зондовых измерений (рис. 2) с помощью формул (2), (3). Поскольку в расчёт спектральной плотности излучения входят величины  $T_e$  и  $n_e$  определены из эксперимента, то величины  $J_\lambda$ ,  $J_\lambda^{\text{brems}}$  также имеют свою погрешность, представленную на графике.

Измеренные и расчётные величины спектральной плотности излучения сильно различаются между собой (рис. 4), как по абсолютной величине так и по относительному изменению, причём наибольшая разница наблюдается в конце области отрицательного свечения, где температура и плотность электронов основной группы минимальны (рис. 2).

Изучение функции распределения электронов по энергиям в области отрицательного свечения показало [8], что помимо основной группы электронов с температурой  $\sim 1\text{эВ}$  в распределение присутствует немногочисленная группа высокоэнергетичных электронов с энергией близкой к потенциалу катодного падения  $U_{fall} \sim \text{кэВ}$ . Появление данной группы связано с тем, что электроны ускоренные сильным электрическим полем в области катодного падения не успевают термализоваться и проникают в сопряжённую область отрицательного свечения, где и происходит их окончательная релаксация.

Оценим вклад высокоэнергетичных электронов в светимость непрерывного спектра за счёт тормозного излучения. Для этого считая, что согласно [9] их функция распределения имеет моноэнергетичный вид с энергией равной напряжению на разряде  $E_{\text{beam}} \approx U_d$ , а концентрация  $n_{\text{beam}}$  на три порядка меньше концентрации основной группы электронов [7], то есть  $n_{\text{beam}} \sim 10^6 \text{ см}^{-3}$ , из (1) получим  $J_\lambda \sim 10^3\text{-}10^4 \text{ эрг}/(\text{см}\cdot\text{с})$ . Учитывая отсутствие точных экспериментальных данных о концентрации  $n_{\text{beam}}$ , в качестве гипотезы объясняющей столь сильное расхождение измеренной и расчётной величины спектральной плотности излучения (см. рис. 4) можно предположить, что

основной вклад в излучение непрерывного спектра области отрицательного свечения тлеющего разряда даёт группа высокоэнергетичных электронов.

### Заключение

Получены новые результаты по излучению в видимой области непрерывного спектра тлеющего разряда низкого давления. Особый интерес вызывает сильное различие между измеренной величиной спектральной интенсивности непрерывного спектра и расчетной величиной тормозного излучения электрона на нейтральных частицах. Измерения превышают расчет на 2–4 порядка. Рассмотрены все элементарные процессы, дающие вклад в светимость непрерывного спектра. Показано, что при исследованных параметрах тлеющего разряда ( $n_e \sim 10^9 - 10^{11} \text{ см}^{-3}$ , степень ионизации  $\delta \sim 10^{-7} - 10^{-5}$ ) основной вклад в непрерывный спектр должно давать тормозное излучение электрона на атоме. Предложена гипотеза для объяснения эффекта сильного расхождения между расчетной и измеренной интенсивностью компонент непрерывного спектра тлеющего разряда низкого давления.

### Литература

1. Ю. Б. Голубовский, А. К. Зинченко, Каган Ю.М. Исследование положительного столба в неоне при повышенных давлениях // ЖТФ. 1977. Т. 47. № 7. С.1478-1485.
2. Ю. Б. Голубовский, В. А. Иванов, Каган Ю.М. Диагностика разряда в неоне при средних давлениях по тормозному континууму // Оптика и спектроскопия. 1973. Т. 35. № 2. С. 213-220.
3. Каган Ю.М., Христов Н.Н Об использовании сплошного спектра гелия для диагностики плазмы среднего давления // Оптика и спектроскопия. 1969. Т. 27. № 4. С. 710-711.
4. Методы исследования плазмы / Под ред. Лохте-Хольтгрёвена В. М.: Мир, 1971. 552 с.



5. Уланов И.М., Литвинцев А.Ю., Пинаев В.А. Влияние продольного магнитного поля на рекомбинационное излучение тлеющего разряда низкого давления в водороде и гелии // ТВТ. 2011. Т. 49. №1. С. 3-12.
6. Очкин В.Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М.: Физматлит, 2010. 592 с.
7. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Интеллект, 2009. 736 с.
8. Cohen C., Kagan Yu. M., Avivi P. The negative glow in a magnetic field in a helium discharge // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. № 7. P. 2914-2919.
9. Jorge J. Rocca, Zeng qi Yu, George J. Collins Studies of a glow discharge electron beam // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. P. 131-136.