

О ДИАГНОСТИКЕ ПЛАЗМЫ В ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЯДЕ В ВОДОРОДЕ. III

В. С. Бородин, В. Б. Гебеков и Ю. М. Каган

В работе показана возможность определения концентрации электронов по суммарному вдоль радиуса контуру линии H_β . Экспериментальные данные, полученные при давлениях 200 и 430 мм рт. ст., подтверждают возможность определения концентрации на оси и хода концентрации электронов вдоль радиуса разряда по измеренной полуширине суммарного контура линии H_β , взятого вдоль диаметра по лучу зрения и относительному ходу интенсивности вдоль радиуса.

1. В работе [1] был дан метод нахождения временного хода электронной концентрации N_e для импульсного разряда в водороде, находящегося в состоянии локального термодинамического равновесия. Концентрация электронов находилась по контуру линии H_β , причем контур предполагался дисперсионным и полуширина его была связана с концентрацией электронов известным соотношением [2]

$$\Delta(t) = c^{-2/3} N_e^{2/3}(t). \quad (1)$$

Суть метода заключалась в том, что для нахождения временной зависимости $N_e(t)$ нет необходимости находить контур линии для каждого момента времени. Достаточно измерить средний по времени контур и ход интенсивности для центра линии. Сравнение концентрации N_e , найденное этим методом и методом развертки контура во времени, сделанное в работе [3], показало для имевшегося в эксперименте хода интенсивности хорошее согласие.

Из выводов, приведенных в работе [1], следует, что подобный метод применим и к случаю, когда нас интересует радиальное распределение концентрации электронов. При этом рабочие формулы будут иметь следующий вид:

$$\frac{1}{2} \int_0^1 f(y) dy = \int_0^1 \frac{c^{-4/3} N_e^{4/3}(0) f^2(y) dy}{4x_1^2 + c^{-4/3} N_e^{4/3}(0) f(y)}, \quad (2)$$

$y = r/R$, где r — расстояние от оси разряда, R — видимый радиус разряда; $4x_1^2$ — квадрат полуширины суммарного контура, взятого вдоль диаметра по лучу зрения (рис. 1); $f(y)$ — радиальный ход интенсивности в центре линии.

Из формулы (2) можно определить концентрацию электронов на оси разряда. Для этого не нужно знать абсолютное значение интенсивности линии.

Для определения радиального хода концентрации электронов $N_e(y)$ необходимо использование соотношений [1]

$$N_e(y) = N_e(0) [f(y)]^{3/4} [F(y)]^{9/8}, \quad (3)$$

$$F(y) = \frac{2}{3} \frac{E_k}{kT(0)} \frac{1}{\frac{2}{3} \frac{E_k}{kT(0)} - \ln f(y)}, \quad (4)$$

E_k — энергия возбуждения верхнего уровня линии H_β . Температура на оси разряда $T(0)$ может быть определена из соотношений для термодинамического равновесия (соотношения (1)–(3) работы [1]).

2. Экспериментальная проверка этих соображений проводилась на установке, описанной в работе [3]. Наблюдения велись поперек разряда.

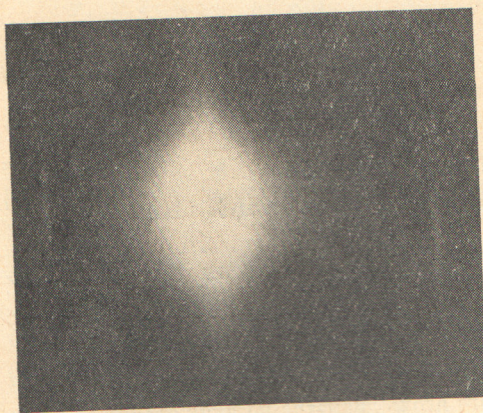


Рис. 1. Суммарный вдоль радиуса контур линии H_β .

С помощью модулятора, синхронизированного с импульсным разрядом, выделялась определенная фаза импульса, в пределах которой интенсивность была практически постоянной во времени. Измерения проводились при двух давлениях: $p=200$ и 430 тор. Точки в обоих случаях были порядка $5 \cdot 10^3$ а.

В табл. 1 приведены значения концентрации электронов на оси разряда, полученные разными методами $N_e(0)$. Здесь $N_{e_1}(0)$ — концентрация электронов, рассчитанная по формуле (1) из усредненного по радиусу контура; $N_{e_2}(0)$ — концентрация электронов, рассчитанная по методу Абеля [4]; $N_{e_3}(0)$ — концентрация электронов, рассчитанная по формуле (2), в

которой $f(y)$ соответствует радиальному распределению интенсивностей, полученному по методу Абеля; $N_{e_4}(0)$ — концентрация электронов, рассчитанная по формуле (2), в которой $f(y)$ соответствует наблюдаемому распределению интенсивности (без обработки по Абелю).

Из табл. 1 видно, что значения N_{e_2} , N_{e_3} и N_{e_4} близки и отличаются от N_{e_1} на $15 \div 20\%$. Отсюда следует, что в тех случаях, когда точность определения концентрации при использовании усредненного контура недостаточна, целесообразно определять ее по формуле (2) без обработки $f(y)$ по методу Абеля.

Рассчитанный с помощью формул (2)–(4) радиальный ход концентрации приведен на рис. 2. Одновременно на этом рисунке приведен ход концентрации при обработке контуров по методу Абеля. Из рис. 2 видно, что расхождения нигде не превышают 20% . Таким образом, можно совершенно избежать такого трудоемкого метода, как обработка каждой точки контура по методу Абеля. Конечно, если радиальное распределение спадает

Таблица 1

Электронные концентрации, рассчитанные разными методами

p , мм рт. ст.	$N_{e_1}(0)$, см^{-3}	$N_{e_2}(0)$, см^{-3}	$N_{e_3}(0)$, см^{-3}	$N_{e_4}(0)$, см^{-3}
200	$4 \cdot 10^{16}$	$4.8 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{16}$	$4.85 \cdot 10^{16}$
430	$5 \cdot 10^{16}$	$5.7 \cdot 10^{16}$	$5.8 \cdot 10^{16}$	$5.7 \cdot 10^{16}$

Таблица 2

Отношение истинной концентрации электронов $N_{\text{ист.}}$ к концентрации электронов N_Σ , рассчитанной по суммарному во времени контуру для различных законов временного спада $f(y)$ интенсивности в центре линии

Вид функции $f(y)$	$N_{\text{ист.}}/N_\Sigma$	Вид функции $f(y)$	$N_{\text{ист.}}/N_\Sigma$
1	1	$\cos(1.57y)$	1.24
$1-y^4$	1.08	$\exp(-5y)$	1.77
$1-y^3$	1.14	$\exp(-5y^2)$	1.45
$1-y^2$	1.21	$1-y$	1.42

круче, то разница между значением $N_{e_1}(0)$ и значениями $N_{e_2}(0)$, $N_{e_3}(0)$, $N_{e_4}(0)$ может быть больше.

В табл. 2 приведено отношение концентрации электронов $N_e(0)$ к концентрации, определенной по усредненному во времени контуру N_{Σ} для различных законов временного спада интенсивности в центре линии $f(y)$. Соответствующие кривые показаны на рис. 3, а. При этом функции $f(y)$ брались такими, чтобы при $y=1$ значения $f(1)$ не превышали значения 10^{-3} .

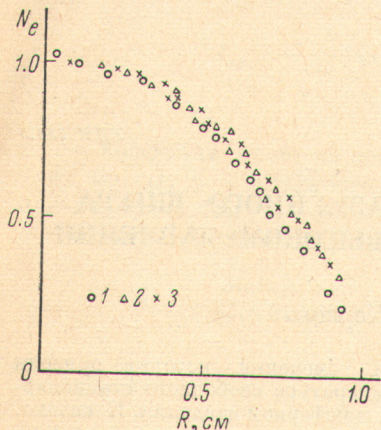


Рис. 2. Радиальный ход концентрации.

1 — ход концентрации, рассчитанный по формулам (2)–(4) без обработки хода интенсивности, по Абелю; 2 — ход концентрации, рассчитанный по формулам (2)–(4) с обработкой хода интенсивности, по Абелю; 3 — ход концентрации, рассчитанной по контуру линии Н β , обработанного по Абелю.

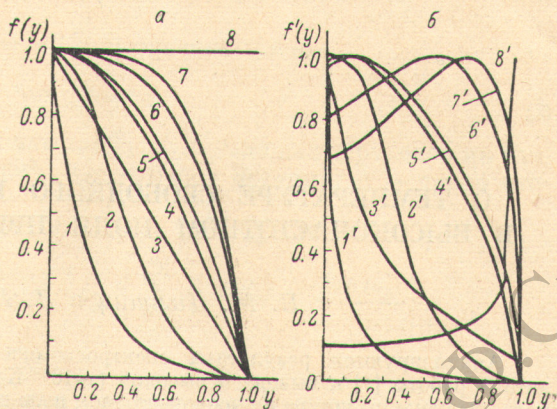


Рис. 3. Наблюдаемый относительный ход интенсивности в центре линии во времени (по радиусу) (а) и обработанный методом Абеля относительный ход интенсивности (по радиусу) (б) для различных функций $f(y)$.

1 — $\exp(-5y)$, 2 — $\exp(-5y^2)$, 3 — $(1-y)$, 4 — $\cos(1.57y)$, 5 — $(1-y^2)$, 6 — $(1-y^3)$, 7 — $(1-y^4)$, 8 — 1.

В табл. 3 приведено отношение концентрации электронов на оси $N_e(0)$ к концентрации, определенной по усредненному по радиусу контуру N_{Σ} для разных наблюдаемых радиальных ходов интенсивности $f(y)$, без обработки по Абелю. Соответствующие обработанные по Абелю кривые радиального распределения интенсивности приведены на рис. 3, б.

Из табл. 2, 3 можно найти значения $N_e(0)$ для широкого класса функций $f(y)$. Данные табл. 2, 3 справедливы в интервале концентраций электронов от 10^{15} – 10^{17} см $^{-3}$ с точностью до 3%.

Таблица 3

Отношение истинной концентрации электронов $N_{ист.}$ к концентрации электронов N_{Σ} , рассчитанной по суммарному радиусу по контуру для различных наблюдаемых ходов $f(y)$ с учетом интенсивности в центре линии по радиусу

Вид функции $f(y)$	$N_{ист.}/N_{\Sigma}$	Вид функции $f(y)$	$N_{ист.}/N_{\Sigma}$
1	3.6	$\exp(-5y^2)$	1.36
$1-y^4$	1.12	$\exp(-5y)$	2.44
$1-y^3$	1.08	$1-y$	1.97
$1-y^2$	1.19	$\exp(-4.6y^3)$	1.25
$\cos 1.57y$	1.25		

Литература

- [1] В. С. Бородин, В. Б. Гебеков, Ю. М. Каган. Опт. и спектр., 31, 4, 1971.
- [2] Г. Грим. Спектроскопия плазмы. Атомиздат, М., 1969.
- [3] В. С. Бородин, В. Б. Гебеков, В. Ф. Гиндина, Ю. М. Каган. Опт. и спектр., 31, 5, 1971.
- [4] Р. Пирс. Сб. «Получение и исследование высокотемпературной плазмы». ИЛ, М., 1962.

Поступило в Редакцию 28 мая 1971 г.