

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕКОМБИНАЦИИ И ДИФФУЗИИ ПО МЕТОДУ МАЛОЙ ПРИМЕСИ

М. Н. Полянский, Н. В. Ремизов, В. Н. Скребов
и А. М. Шухтин

Предлагается метод определения скорости гибели заряженных частиц в плазме импульсного разряда, основанный на сравнении характера свечения во времени спектральных линий двух разных элементов, один из которых присутствует в разряде в виде малой примеси. Показано, что метод может быть использован для определения коэффициентов рекомбинации и диффузии ионов этой примеси. Приведены результаты эксперимента в разряде в гелии при наличии малой примеси водорода.

Одной из задач, связанных с газоразрядной плазмой, является задача по определению скорости гибели заряженных частиц в плазме. Экспериментальные методы определения этой величины сводятся в основном к нахождению временной зависимости концентрации свободных электронов или метастабильных атомов.

Однако в некоторых случаях, когда трудно создать достаточно высокую плотность атомов исследуемого элемента, указанные методы не могут быть применены.

В данной работе предлагается метод, который позволяет обойти эти затруднения.

Теоретическая часть

При концентрациях свободных электронов в плазме $n_e \geq 10^{13}$ см⁻³ высоковозбужденные состояния атома будут находиться в термодинамическом равновесии с континуумом [1] и их заселенность в любой момент времени будет определяться по формуле Саха

$$n = \frac{1}{2} n_e n^+ \frac{g}{\omega} \left(\frac{h}{2\pi m_e k T_e} \right)^{3/2} e^{\frac{\Delta E}{k T_e}}, \quad (1)$$

где g и ω — статистические веса атома и иона, ΔE — потенциал ионизации атома с данного высоковозбужденного уровня.

Интенсивность спектральной линии, для которой данный уровень является исходным, определится из соотношения

$$I = C n_e n^+ T_e^{-3/2} e^{\frac{\Delta E}{k T_e}}, \quad (2)$$

где C — константа для данного уровня, смысл которой ясен из (1).

В распадающейся неравновесной плазме импульсного разряда заселенность рассматриваемых уровней, а следовательно, и интенсивность линий, испущенных с этих уровней, будет меняться во времени, достигая максимума, а затем спадая до нуля. В момент времени t_1 , когда интенсивность линии достигает максимума, должно выполняться условие

$$\left. \frac{dI_1}{dt} \right|_{t_1} = I_1 \left[\frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dt} + \frac{1}{n^+} \frac{dn^+}{dt} - \left(\frac{3}{2} + \frac{\Delta E}{k T_e} \right) \frac{1}{T_e} \frac{dT_e}{dt} \right] = 0. \quad (3)$$

Учитывая, что для высоких возбужденных состояний $\Delta E \ll kT_e$ и считая, что в плазме выполняется условие квазинейтральности, перепишем полученное выражение в упрощенном виде

$$\frac{dI_1}{dt} \Big|_{t_1} = I_1 \left(\frac{2}{n_e} \frac{dn_e}{dt} - \frac{3}{2} \frac{1}{T_e} \frac{dT_e}{dt} \right) = 0. \quad (3')$$

Пусть разрядная трубка содержит смесь двух газов с концентрациями нормальных атомов соответственно, причем второй газ присутствует в виде малой примеси, т. е.

$$n_1 \gg n_2 \text{ и } n_1^+ \gg n_2^+, \text{ т. е. } n_1^+ \approx n_e. \quad (4)$$

В силу приведенных выше рассуждений в тот момент времени, когда интенсивность спектральной линии примеси, испущенной с высоковозбужденного уровня, достигает максимума, будет выполняться условие

$$\frac{dI_2}{dt} \Big|_{t_2} = I_2 \left(\frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dt} + \frac{1}{n_2^+} \frac{dn_2^+}{dt} - \frac{3}{2} \frac{1}{T_e} \frac{dT_e}{dt} \right) = 0. \quad (5)$$

В общем случае моменты максимумов интенсивности линий основного газа и примеси, т. е. t_1 и t_2 могут не совпадать.

Проанализируем возможные случаи.

1. $t_1 < t_2$, т. е. раньше достигает максимума линия основного газа. Тогда в момент времени t_1 величина $dI_2/dt > 0$, так как интенсивность линии примеси еще не достигла максимума. Учитывая это неравенство, получим из (3') и (5), что в момент времени t_1 выполняется неравенство

$$\left| \frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dt} \right| < \left| \frac{1}{n_2^+} \frac{dn_2^+}{dt} \right|,$$

т. е. относительная скорость гибели ионов основного газа n_1^+ в момент времени t_1 больше, чем ионов примеси.

2. $t_2 < t_1$, т. е. раньше достигает максимума линия примеси. Рассуждая так же, как и в предыдущем случае, получим, что в момент времени t_2 выполняется условие

$$\left| \frac{1}{n_2^+} \frac{dn_2^+}{dt} \right| > \left| \frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dt} \right|,$$

т. е. в момент времени t_2 скорость гибели ионов примеси больше, чем ионов основного газа.

Нетрудно показать, что полученные соотношения выполняются не только в момент первого максимума, но и после него, вплоть до появления максимума на линии атомов второго сорта.

3. $t_1 = t_2$. Очевидно, что в этом случае получим

$$\frac{1}{n_2^+} \frac{dn_2^+}{dt} = \frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dt}.$$

Таким образом, сравнивая положение во времени максимумов интенсивности линий с высоковозбужденных уровней двух различных сортов атомов, из которых один присутствует в разряде в виде малой примеси, можно для промежутка времени между максимумами сделать вывод о соотношении относительных скоростей гибели ионов каждого сорта.

Перепишем теперь условие (5) в следующем виде:

$$\frac{1}{n_2^+} \frac{dn_2^+}{dt} = \frac{3}{2} \frac{1}{T_e} \frac{dT_e}{dt} - \frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dt}. \quad (6)$$

Из полученного выражения следует, что для момента максимума на линии примеси можно получить значение относительной скорости гибели ионов примеси n_2^+ через n_e и t_e . При этом, как видно, не потребуется знать концентрацию атомов и ионов примеси, что является необходимым при использовании других известных методов измерений.

Рассмотрим возможные применения полученного выражения.

Пусть основной причиной гибели ионов примеси является рекомбинация, т. е.

$$\frac{1}{n_2^+} \frac{dn_2^+}{dt} = -\alpha_2 n_e \quad (7)$$

Подставляя (7) в (6), получим для коэффициента рекомбинации ионов примеси в момент максимума интенсивности на линии примеси

$$\alpha_2 |_{t_2} = \frac{1}{n_e} \left(\frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dt} - \frac{3}{2} \frac{1}{T_e} \frac{dT_e}{dt} \right). \quad (8)$$

Если основной причиной гибели ионов примеси является амбиполярная диффузия, то для цилиндрической геометрии справедливо соотношение [2]

$$\frac{1}{n_2^+} \frac{dn_2^+}{dt} = - \left(\frac{R}{2.4} \right)^2 D_{a_2}, \quad (9)$$

где R — радиус разрядной трубки.

Подставляя (9) в (6), получим для коэффициента амбиполярной диффузии ионов примеси

$$D_{a_2} |_{t_2} = \left(\frac{2.4}{R} \right)^2 \left(\frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dt} - \frac{3}{2} \frac{1}{T_e} \frac{dT_e}{dt} \right). \quad (10)$$

Здесь необходимо отметить, что в общем случае, когда плазма содержит заряженные частицы трех сортов, для каждого сорта необходимо вводить собственный коэффициент амбиполярной диффузии [3], который зависит от отношения концентраций диффундирующих частиц. Однако для нашего случая, когда ионы примеси составляют малую часть от общего числа заряженных частиц, можно показать, что коэффициент амбиполярной диффузии ионов примеси не будет зависеть от этого отношения

$$D_{a_2} \approx \frac{D_e b_2 + D_2 b_e}{b_e + b_1}, \quad (11)$$

где D_e и D_2 — коэффициенты диффузии электронов и ионов примеси; b_e , b_1 , b_2 — подвижность электронов, ионов основного газа и ионов примеси.

Таким образом, если каким-либо способом определить вид зависимостей $n_e(t)$ и $T_e(t)$ для послесвечения импульсного разряда, то, пользуясь приведенными результатами, можно определить коэффициент рекомбинации α_2 или коэффициент амбиполярной диффузии D_{a_2} ионов примеси.

Экспериментальные результаты

Предложенная методика определения скорости гибели ионов примеси проверялась для случая импульсного разряда в гелии при давлении гелия $P_{He} = 10$ тор при наличии малой примеси водорода.

Спектроскопически исследовался временной ход интенсивности линий гелия и водорода с высоковозбужденных состояний, отстоящих от потенциала ионизации на величину $\Delta E < 0.5$ эв. На рис. 1 схематически представлен временной ход интенсивности линий гелия и водорода. Поскольку линия водорода достигает максимума интенсивности раньше, чем линия гелия, то в соответствии с предложенной теорией этот факт должен означать, что в момент времени t_2 , когда линия водорода достигает максимума, относительная скорость гибели ионов водорода должна быть больше, чем ионов гелия.

Для получения количественных результатов проводились зондовые измерения, с помощью которых были построены графики зависимости $n_e(t)$ и $T_e(t)$ для раннего послесвечения исследуемого разряда (рис. 2).

Из полученных кривых, а также с учетом (6), было найдено, что в момент времени t_2 относительные скорости гибели ионов гелия и водорода равны соответственно

$$\left| \frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dt} \right| = 3 \cdot 10^4 \text{ сек.}^{-1},$$

$$\left| \frac{1}{n_2^+} \frac{dn_2^+}{dt} \right| = 3.6 \cdot 10^5 \text{ сек.}^{-1},$$

т. е. качественное соотношение между этими величинами, полученное из анализа временного хода линий гелия и водорода, подтвердилось.

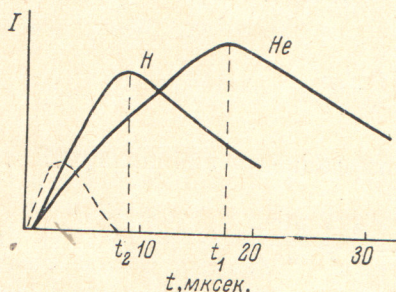


Рис. 1. Зависимость интенсивности линий гелия и водорода от времени (штриховая линия изображает импульс тока).

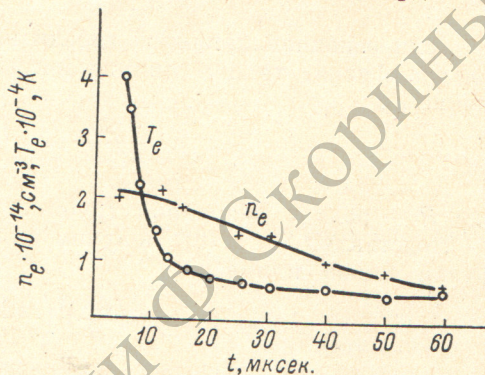


Рис. 2. Зависимость n_e и T_e от времени.

Момент времени t_2 соответствует условиям в разряде $T_e = 1.6 \cdot 10^4 \text{ K}^\circ$ и $n_e = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Оценки показывают, что при этих условиях основную роль в гибели ионов водорода играет амбиполярная диффузия. Подставляя полученное значение для относительной скорости гибели ионов водорода в (10), получим для коэффициента амбиполярной диффузии ионов водорода следующее значение:

$$D_{a_2} = 4.5 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{сек.}$$

З а к л ю ч е н и е

Предложенная методика позволяет определять коэффициенты рекомбинации и диффузии ионов различных сортов путем введения их в виде малой примеси в разряд с хорошо известными параметрами континуума.

Методика может быть полезной в тех случаях, когда обычные методы определения α и D_a не могут быть использованы, например, для ионов тугоплавких металлов или в других случаях, когда не удается создать достаточно высокую плотность частиц исследуемого элемента.

Достоинством методики является тот факт, что она не требует знания концентрации примеси и ее ионов.

К недостаткам метода следует отнести то, что искомые величины определяются только для какого-то одного момента времени, т. е. для данных условий. Однако можно ожидать, что путем изменения условий в разрядной трубке этот недостаток можно устранить.

Следует отметить также, что для уменьшения ошибки измерений необходимо по возможности точнее определять значения dn_e/dt и dT_e/dt , что может представлять известную трудность.

Литература

- [1] Диагностика плазмы. Под ред. Р. Хаддлстуона и С. Леонарда. М., 1967.
- [2] В. Л. Грановский. Электрический ток в газах, т. I, М., 1952.
- [3] I. V. Thompson. Proc. Phys. Soc., 73, 818, 1959; A. V. Phelps, S. C. Brown. Phys. Rev., 86, 102, 1952.

Поступило в Редакцию 12 июля 1972 г.