

О СОСТОЯНИИ РАВНОВЕСИЯ МАЛОЙ ПРИМЕСИ ВОДОРОДА В СИЛЬНОИОНИЗОВАННОМ АРГОНЕ

Н. С. Ворыпаева, Л. С. Николаевский и И. В. Подмошенский

Обнаружено отклонение от равновесия 5%-й примеси водорода в Ar-плазме, генерируемой в сильноточной импульсной дуге, при $P=0.25$ атм и диаметре разрядного канала $d=10$ мм. При этом получена 3-кратная недозаселенность уровня $n=4$ атома водорода. С увеличением давления до $P=0.5$ атм и диаметра канала $d=20$ мм (при сохранении температуры плазмы неизменной) степень отклонения от равновесия уменьшается.

Под малой примесью будем понимать такую добавку постороннего газа, концентрация которого не изменяет параметры разряда в основном газе, но достаточна, чтобы появились пригодные для диагностики линии добавки. В этом случае температура T_e и электронная плотность n_e определяются основным газом, в то же время линии примеси дают возможность произвести дополнительные и независимые измерения T_e и n_e [1]. Этот метод обладает важным достоинством: при использовании примесных линий практически снимается вопрос о реабсорбции в них.

Однако в самой физической сущности этого метода заложена возможность ошибочной диагностики, на которую, к сожалению, часто не обращают внимания. Дело в том, что газ, выступающий в качестве примеси, должен находиться в локальном термодинамическом равновесии (ЛТР) при T_e и n_e , задаваемых основным газом, что, как это будет видно ниже, не всегда имеет место.

Целью настоящей работы является исследование состояния равновесия малой примеси водорода в сильноионизованном аргоне. Выбор аргона в качестве основного газа обусловлен тем, что аргон при сильной ионизации находится в ЛТР при давлениях $P \geq 0.1$ атм [2]. Кроме того, в силу своего большого атомного веса он меньше подвержен диффузии. Водород же интересен тем, что он является одним из газов, позволяющим с высокой точностью производить измерения n_e по линии H_{β} , а заселенности уровней рассчитаны теорией как для равновесного, так и неравновесного состояний.

Постановка данного эксперимента потребовала получения сильноионизованной спокойной и стационарной аргоновой плазмы. Такая плазма создавалась в стабилизированной импульсной дуге (СИД) [3] при диаметре стабилизирующих трубок 10 и 20 мм и длине температурно однородного дугового канала 100 мм. Разрядный ток при этом мог изменяться от 120 до 1000 А. Разрядная камера СИД после вакуумирования заполнялась аргоном с добавкой водорода. Смешивание водорода с аргоном производилось в специальном устройстве, в котором многоструйное перемешивание газов происходило под высоким давлением. Спектры фотографировались по направлению оси разряда с помощью спектрографа СТЭ-1 ($d\lambda/dl = 8-10 \text{ \AA/мм}$).

Первая серия экспериментов была поставлена при общем давлении смеси $P=0.25$ атм, разрядном токе $i=120$ А и диаметре кварцевых трубок 10 мм. Величина общего давления смеси и процентного содержания водорода были выбраны таковыми, чтобы, во-первых, абсолютная концентра-

дия водорода была больше концентрации «стеночного» водорода, появляющегося даже в чистом аргоне за счет выхода адсорбированных на стенках трубки паров воды, и, во-вторых, чтобы было исключено возможное разделение смеси в плазменных условиях. Как было показано ранее [4] на примере аргон-азотной плазмы, явление разделения смеси наблюдалось начиная с 10%-й добавки азота, увеличивалось при росте концентрации азота, достигая максимума при равных количествах аргона и азота. В нашем случае отсутствие явления разделения было проверено специальным экспериментом: при двукратном увеличении водорода измерялась полная интенсивность линии H_{β} . Если явление разделения смеси отсутствует, а добавка «стеночного» водорода незначительна, то полная интенсивность линии водорода должна возрасти вдвое, что и наблюдалось в эксперименте при увеличении концентрации водорода с 3 до 6%. В то же время при увеличении концентрации водорода с 5 до 10% пропорциональность роста полных интенсивностей линий H_{β} нарушалась вследствие разделения смеси. Напомним, что в азот-аргоновой смеси разделение при 10%-й добавке азота еще не наблюдалось, что можно объяснить значительно большей подвижностью водорода в сравнении с азотом. Поэтому за рабочую концентрацию водорода была принята 5%-я добавка. При фотометрировании контуров интенсивность «стеночного» водорода вычиталась из интенсивности наблюдаемого контура.

Температура плазмы определялась абсолютным методом по четырем линиям ионов аргона $Ag II$ ($\lambda=4579.3, 4545.0, 4426.0, 4379.7 \text{ \AA}$). В качестве эталонного излучателя использовался непрерывный спектр чистой Ag -плазмы, интенсивность которого была раньше хорошо промерена при $P=1.0$ атм. Фактор Бибермана в измерительном спектральном диапазоне брался равным $\xi(\nu)=1.65$.

Концентрация электронов измерялась по полуширине линии водорода H_{β} из пяти независимых экспериментов. Кроме этого, по тому же аргоновому эталону была определена абсолютная заселенность $n_{0,4}$ верхнего уровня H_{β} . Зная T_e , n_e и $n_{0,4}$ и предполагая выполнимость условий частичного ЛТР для верхнего уровня H_{β} с квантовым числом $i=4$, по формуле Саха—Больцмана

$$\frac{n_1 n_e}{n_{0,4}} = \frac{2U_1}{g_{0,4}} - 2.41 \cdot 10^{15} T_e^{3/2} \exp\left(\frac{E_4 - \chi_0}{kT_e}\right)$$

можно рассчитать концентрацию протонов n_1 . Здесь U_1 — статистическая сумма по состояниям протона, $g_{0,4}$ — статистический вес верхнего уровня H_{β} , E_4 — энергия возбуждения H_{β} , χ_0 — потенциал ионизации водорода. Экспериментальная концентрация нейтрального водорода $n_{0,1}$ рассчитывалась из закона Дальтона по известным значениям n_e , n_1 и парциального давления водорода в предположении, что разделения исходного состава по компонентам не происходит. Для оценки степени отклонения экспериментальных заселенностей $n_{0,4}$, n_1 от равновесных $n_{0,4}^*$, n_1^* , последние были рассчитаны с помощью таблиц [5] для данного состава смеси $Ag+H_2$. Результаты первой серии экспериментов сведены в таблицу (см. верхнюю строку), там же приведен коэффициент $b_{0,1}=n_{0,1}/n_{0,1}^*$, характеризующий степень отклонения водорода от ионизационного равновесия. Как видно из таблицы, наблюдается ~ 3 -кратная недозаселенность уровня $i=4$ и ~ 5 -кратная перезаселенность основного состояния атома водорода ($i=1$).

Во второй серии экспериментов была сделана попытка улучшить условия для равновесия. С этой целью общее давление смеси было доведено до 0.5 атм, а диаметр стабилизирующей кварцевой трубки — до 20 мм. Более высокое давление при практически неизменной температуре позволило двукратно повысить n_e , а увеличение диаметра — еще больше уменьшить эффективность процессов диффузионного разделения смеси. Разрядный ток был подобран таким, что температура плазмы осталась практически неизменной ($T_e \approx 15000 \text{ K}$). Проверка на отсутствие разделения смеси была проведена таким же образом, как и в первом случае. Оказалось, что

P , атм	T_e , К	n_e	$n_{0,4}$	$n_{0,4}^*$	n_1
0.25	14800	$4.3 \cdot 10^{16}$	$4.7 \cdot 10^{11}$	$1.57 \cdot 10^{12}$	$1.53 \cdot 10^{15}$
0.50	14500	$9.5 \cdot 10^{16}$	$2.82 \cdot 10^{12}$	$4.75 \cdot 10^{12}$	$4.0 \cdot 10^{15}$

Продолжение

n_1^*	$n_{0,1}$	$n_{0,1}^*$	$b_{0,1}^{\text{эксп.}} = \frac{n_{0,1}}{n_{0,1}^*}$	$b_{0,1}^{\text{теор.}} = \frac{n_{0,1}}{n_{0,1}^*}$
$0.437 \cdot 10^{16}$	$9.14 \cdot 10^{15}$	$1.87 \cdot 10^{15}$	4.88	2.00
$0.675 \cdot 10^{16}$	$1.7 \cdot 10^{16}$	$7.8 \cdot 10^{15}$	2.18	1.40

в широкой трубке пропорциональность между интенсивностью линии H_{β} и абсолютной концентрацией водорода сохраняется даже при изменении концентрации водорода от 5 до 10%, чего не наблюдалось в узкой трубке. Этого и следовало ожидать, так как эффективность диффузионных процессов квадратично зависит от радиуса дугового канала. Результаты диагностики по тем же параметрам, что и в первом случае, представлены в нижней строчке таблицы. Как видно из таблицы, в результате двукратного увеличения P и n_e водород действительно становится более равновесным.

Прежде чем сделать окончательный вывод, следует проанализировать возможные ошибки диагностики. Абсолютный метод измерения температуры обеспечивает точность $\Delta T_e/T_e \leq 5\%$, ошибка в электронной плотности при использовании H_{β} $\Delta n_e/n_e \approx 10\%$. Погрешность в определении заселенностей по оценке $\Delta n_{0,4}/n_{0,4} \approx 15\%$, а $\Delta n_{0,1}/n_{0,1} \approx 20\%$. Следовательно, возможная погрешность измерений не объясняет кратное отличие коэффициента $b_{0,1}$ от единицы. Другим фактором, могущим исказить истинность полученных результатов, является присутствие «стеночного» водорода. Но, как показывает внимательное рассмотрение, даже в случае его неполного учета степень отступления от ЛТР может при этом только уменьшиться, поскольку абсолютная заселенность $n_{0,4}$ возрастет при увеличении числа протонов n_1 , определяемых из формулы Саха—Больцмана. Последнее приведет к соответствующему уменьшению числа нейтралов, рассчитываемому из закона Дальтона, и, следовательно, степень отклонения от равновесия может только уменьшиться.

Следовательно, малая примесь водорода в сильноионизованном аргоне при общем давлении смеси 0.25 и 0.50 атм и $T_e = 15\ 000$ К находится в состоянии ионизационного неравновесия при $n_e = 4.3 \cdot 10^{16}$ см⁻³ и $n_e = 9.5 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Этот вывод не противоречит теории. Согласно детальным расчетам Дравина [6], для обеспечения полного ЛТР ($b_{0,1} = 1.0$) в однородной, стационарной водородной плазме при $T_e = 12\ 000$ К и оптической толстой резонансной линии L_{α} (а в нашем случае, как показывают оценки, при обоих давлениях оптическая толщина этой резонансной линии ≈ 100) критическое значение электронной плотности $n_e^{\text{кр.}} \geq 2 \cdot 10^{17}$ см⁻³. При более низких значениях n_e , соответствующих эксперименту, и $T_e = 15\ 000$ К коэффициент $b_{0,1}$, характеризующий степень отклонения от ЛТР, составляет $b_{0,1} \approx 1.4$ и $b_{0,1} \approx 2.0$ соответственно для $n_e = 4.3 \cdot 10^{16}$ см⁻³ и $n_e = 9.5 \cdot 10^{16}$ см⁻³.

Примерно двукратное, как это видно из таблицы, расхождение между $b_{0,1}^{\text{эксп.}}$ и $b_{0,1}^{\text{теор.}}$ следует признать допустимым, поскольку при расчете столкновительных и радиационных процессов используется большое число индивидуальных атомных характеристик.

Литература

- [1] В. Лохте-Хольтгревен. В сб.: Методы исследования плазмы, 108. «Мир», М., 1967.
- [2] Н. С. Груздева, А. С. Николаевский, И. В. Подмошенский. Опт. и спектр., 37, 1002, 1974.
- [3] Л. С. Николаевский, И. В. Подмошенский, Б. А. Филиппов. Ж. прикл. спектр., 12, 615, 1970.
- [4] Н. С. Воряпаева, Л. С. Николаевский, И. В. Подмошенский. Опт. и спектр., 42, 264, 1977.
- [5] H. W. Drawin, P. Felenbok. Date for Plasmas in LTE. Paris, 1965.
- [6] H. W. Drawin. Ergebnisse der Plasmaphysik, bd. 3, Berlin, 1972.

Поступило в Редакцию 28 декабря 1976 г.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. СКОРИНЫ