

## ЭФФЕКТ ДЕКОМПЕНСАЦИИ ПЛОТНОГО ПУЧКА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

*М.Д.Габович, Д.Г.Джаббаров, А.П.Найда*

Обнаружен эффект сильной декомпенсации пучков отрицательных ионов с плотностью  $\approx 50$  мА/см<sup>2</sup>, возникающий по мере их распространения в газе.

Проблема компенсации объемного заряда пучков отрицательных ионов с плотностью тока  $\sim 100$  мА/см<sup>2</sup> становится особенно актуальной в связи с перспективой их использования для инъекции мощных потоков быстрых атомов в установки типа "Токамак" [1]. Эта проблема возникает в связи с необходимостью транспортировки отрицательных ионов в протяженном тракте инжектора при низком давлении газа, когда потери ионов из-за столкновений с атомами газа могут быть сведены к минимуму.

При относительно высоких давлениях газа наблюдалась газовая фокусировка пучков отрицательных ионов малой плотности ( $\sim 1$  мА/см<sup>2</sup>) и возбуждение в них ионных колебаний [2, 3]. Однако вопрос об особенностях этих колебаний при низких давлениях газа и влиянии их на плотный пучок и его компенсацию оставался невыясненным. В настоящей работе обнаружен эффект сильной декомпенсации сильных пучков отрицательных ионов, возникающий по мере распространения этих пучков из-за развивающейся пучковой неустойчивости.

Экспериментальная установка схематически показана на рис.1. Исследовался пучок отрицательных ионов водорода с параметрами: ток до 80 мА, плотность тока до 50 мА/см<sup>2</sup>, энергия ионов  $\approx 15$  кэВ, длительность импульса 0,6 мсек; давление газа  $2 \cdot 10^{-6} + 10^{-4}$  тор, начальные пульсации тока незначительны — менее 1%.

Степень компенсации объемного заряда пучка определялась по его потенциалу. Для измерения последнего применен емкостной зонд специальной конструкции. Он представлял собой тонкую металлическую трубку, насаженную на кварцевый изолятор, окружающий стержень, соединенный с кабелем, имеющим относительно большую емкость. Поскольку коэффициент ионно-электронной эмиссии металлической повер-

хности зонда больше единицы, в стационарном состоянии поверхность зонда принимает потенциал, близкий к потенциалу пространства [4]. Емкость зонда была достаточно малой, и потенциал его поверхности практически безынерционно следовал за наблюдаемыми быстрыми изменениями потенциала пучка. Ток пучка измерялся поясами Роговского, плотность тока — цилиндрами Фарадея.

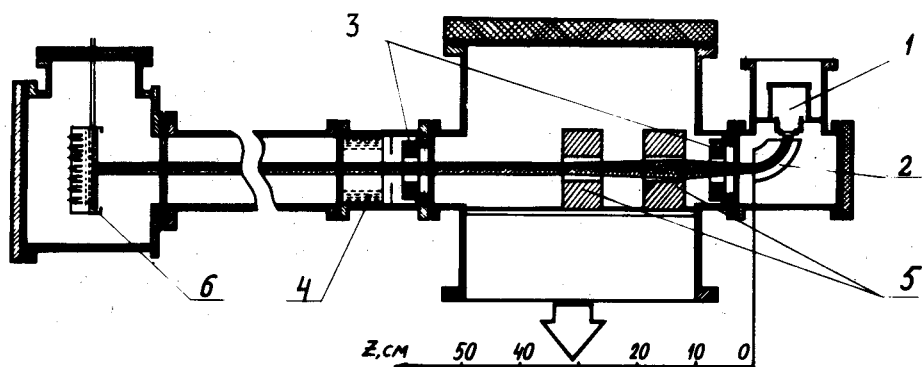


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — источник отрицательных ионов; 2 — поворотный фокусирующий магнит; 3 — пояса Роговского; 4 — анализатор положительных ионов и электронов; 5 — полюса квадрупольной магнитной линзы; 6 — коллекторы

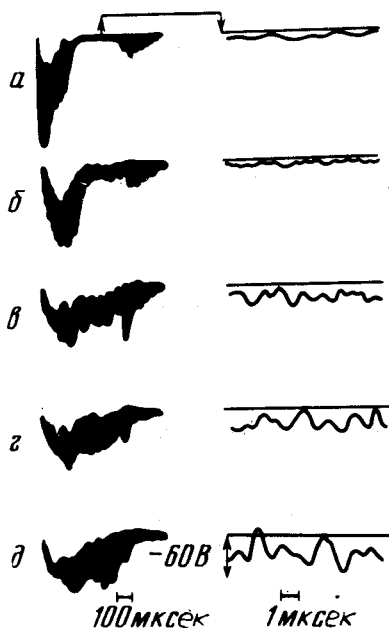


Рис. 2. Осциллограммы потенциала в пучке (слева — медленная, справа — быстрая развертки)  $Z$  равно: а — 10, б — 20, в — 30, г — 35, д — 45 см;  $p = 2,5 \cdot 10^{-6}$  тор

На рис.2 приведены осциллограммы потенциала в пучке, полученные при различных расстояниях  $Z$  зонда от начала камеры. Большой отрицательный потенциал в начале импульса (при малой величине  $Z$ ) соответствует еще не компенсированному заряду пучка. В этот период последний сильно расплывается, часть его гибнет на стенках камеры, и поэтому с увеличением  $Z$  потенциал, пропорциональный току пучка в данном месте, значительно уменьшается. После истечения расчетного времени компенсации  $\tau_K = (n_a \sigma_i v_-)^{-1}$ , в течение которого могут накапливаться положительные ионы, при малых  $Z$  наблюдается хорошая компенсация пучка — отсутствие больших статических и переменных полей (рис.2,  $a$ ), а также пульсаций плотности пучка;  $n_a$  — концентрация атомов в камере,  $v_-$  — скорость ионов пучка,  $\sigma_i$  — сечение образования медленных ионов при столкновении отрицательного иона с атомом. Однако уже на пути в  $20 \div 30$  см компенсация нарушается — в пучке возникают пульсации отрицательного потенциала, амплитуда которых нарастает до значений, составляющих десятки процентов от потенциала полностью некомпенсированного пучка  $\Delta\phi = J_-/v_-$ , где  $J_-$  — ток пучка в данном сечении.

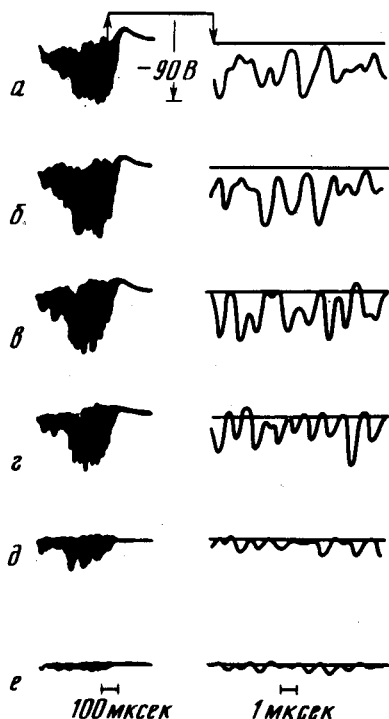


Рис. 3. Осциллограммы потенциала в пучке:  $p$  равно:  $a - 5 \cdot 10^{-6}$ ,  $б - 1,4 \times 10^{-5}$ ,  $в - 2,8 \cdot 10^{-5}$ ,  $г - 4 \cdot 10^{-5}$ ,  $д - 6 \cdot 10^{-5}$ ,  $е - 6,8 \cdot 10^{-5}$  тор;  $Z = 50$  см

О том, что наблюдаемое явление связано с пучковой ион-ионной неустойчивостью свидетельствуют такие факты:

1. Амплитуда пульсаций нарастает в направлении распространения пучка;

2. Рассчитанная по плотности пучка ленгмюровская частота компенсирующих положительных ионов  $f_+ = (e^2 n_+ / \pi M_+)^{1/2}$  близка к характерной частоте наблюдаемых пульсаций потенциала  $\sim 1$  МГц.

3. Пропорциональные плотности тока сигналы, снимаемые с симметричных по отношению к оси коллекторов, разнесенных на 20 мм, находятся в противофазе; это свидетельствует о том, что колебания происходят в направлении, перпендикулярном направлению распространения пучка.

4. При больших  $Z$  глубокие пульсации потенциала сопровождаются почти 100%-ми пульсациями плотности тока пучка (при постоянстве общего тока).

Важной характеристикой условий возникновения наблюдаемых колебаний является зависимость их амплитуды от давления газа (рис. 3). Оценки показывают, что при низких давлениях  $p = 5 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-5}$  тор образующие электроны быстро из него уходят и отношение их концентрации к концентрации положительных ионов очень мало:  $n_e/n_+ \approx 5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$ . Это объясняет возможность существования наблюдаемых пульсаций большой амплитуды и независимость ее от давления газа в указанном интервале. При дальнейшем увеличении давления газа в начале камеры наблюдается известный переход от отрицательного к небольшому положительному потенциалу, при котором концентрация электронов становится сравнимой с концентрацией положительных ионов; это сопровождается значительным уменьшением амплитуды колебаний потенциала.

Таким образом, в работе показано, что даже в отсутствие значительных начальных пульсаций тока, из-за возникновения пучковой ион-ионной неустойчивости в компенсированном пучке отрицательных ионов по мере его распространения возникают сильные пульсации отрицательного потенциала. Связанные с ними поля могут приводить к его расплыванию и увеличению эмиттанса, т.е. препятствовать транспортировке интенсивного пучка отрицательных ионов при низких давлениях газа.

Институт физики  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
24 февраля 1979 г.

## Литература

- [1] Н.Н. Семашко. Атомная энергия, 45, 470, 1978.
- [2] М.Д. Габович, А.П. Найда, И. М. Проценко, Л.С. Симоненко, И.А. Солошенко: ЖТФ, 44, 861, 1974.
- [3] М.Д. Габович, Л.С. Симоненко, И.А. Солошенко, Н.В. Шкорина. ЖЭТФ, 67, 1710, 1974.
- [4] М.Д. Габович, А.П. Найда. УФЖ, 15, 861, 1971.