

Б. Н. МАКОВ

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ

(Представлено академиком Л. А. Арцимовичем 27 XI 1970)

Методика Лэнгмюра является основной при определении локального потенциала плазмы (1). Однако интерпретация результатов усложняется, когда плазма находится в магнитном поле, поскольку зондовые характеристики не имеют явно выраженного насыщения; использование метода эмитирующего зонда вызывает ряд экспериментальных трудностей (2).

Хорошо известно, что электрод, погруженный в плазму и имеющий отличный от нее потенциал, окружается тонкой областью пространственного заряда — слоем. Толщина слоя для плоского случая определяется законом Чайлда — Лэнгмюра. Она изменяется так, что поток вектора электрического поля от электрода заканчивается на движущихся зарядах:

$$d = \frac{1,53 \cdot 10^{-3} V^{3/4}}{(M/m)^{1/4} j^{1/2}}$$

Здесь d — толщина слоя в см, M и m — масса иона и электрона соответственно, j — плотность тока в а/см², V — разность потенциалов в вольтах.

Новая возможность определения потенциала плазмы появляется, если использовать отсутствие слоя у поверхности зонда как признак исчезновения электрического поля между зондом и плазмой (что может быть только при равенстве их потенциалов). Ее легко реализовать, если в теле зонда сделать малые отверстия размером b , а за ними (относительно плазмы) поместить коллектор при заведомо положительном (отрицательном) потенциале по отношению к плазме. При изменении потенциала зонда плазма начинает протекать через отверстия к коллектору при $2d_1 < b$, при $d = 0$ концентрация плазмы у поверхности коллектора будет максимальной и при $2d_2 = b$ протекание плазмы к коллектору прекратится. Здесь через d_1 и d_2 обозначены толщины ионных и электронных слоев у поверхности зонда при повышении его потенциала. Изменение плотности плазмы у поверхности коллектора выразится соответственно через величину электронного или ионного тока в его цепи. Следовательно, подобрав размеры отверстий по параметрам плазмы и изменяя потенциал зонда в широком диапазоне, в цепи коллектора получим узкий пик тока, вершина которого соответствует моменту равенства потенциалов зонда и плазмы. Таким образом, определение потенциала в месте расположения зонда сводится к измерению его потенциала вольтметром по отношению к выбранному опорному электроду при максимуме тока в цепи коллектора. Очевидно, в данном случае, как и в других случаях при зондовых измерениях, определяется потенциал плазмы у поверхности зонда, искаженный внесением

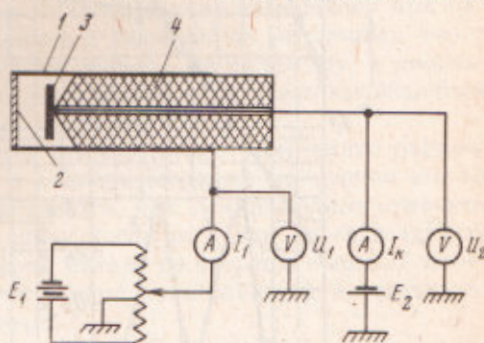


Рис. 1. Конструкция зонда и схема включения. 1 — тонкая металлическая трубка, изолированная снаружи; 2 — сетка; 3 — коллектор; 4 — изолятор

зонда. Искажения особенно сильны при измерениях в магнитном поле (2). Следует отметить, что наша методика применима и для измерения потенциала плазмы в магнитном поле, с учетом сказанного выше.

Экспериментальная проверка проводилась с зондом, схематически показанным на рис. 1. Использовались сетки 2 из меди, никеля, нержавеющей стали и молибдена с размерами ячеек от нескольких до 100 м. При $0 \leq H < 50$ э с целью получения неискаженной формы пика электронного тока коллектора из плазмы перед коллектором к трубке приваривался эк-

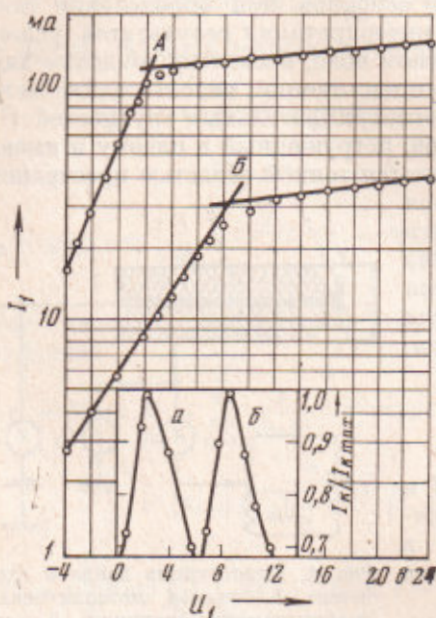


Рис. 2

Рис. 2. А и Б — лэнгмюровские зависимости в полулогарифмическом масштабе; а и б — вершины пиков электронного тока в цепи коллектора, приведенные к максимуму тока; $H = 0$; А, а — $Q = 5$ см³/мин, $I_p = 5$ а, $U_p = 50$ в; Б, б — $Q = 2$ см³/мин, $I_p = 5,2$ а, $U_p = 70$ в

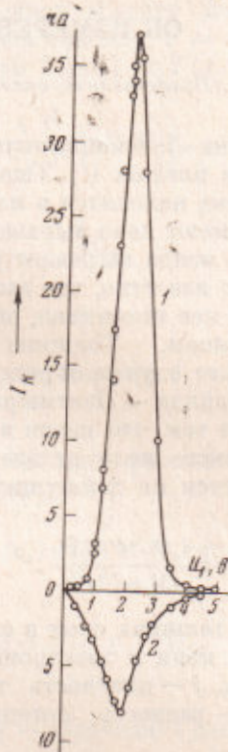


Рис. 3

Рис. 3. Зависимости электронного (1) и ионного (2) токов в цепи коллектора от U_1 при $H = 700$ э, $I_p = 0,6$ а, $U_p = 87$ в, $Q = 5,5$ см³/мин. 1 — $U_2 = \pm 20$ в, 2 — $U_2 = -20$ в. Сетка с ячейками 12 м

ран (не препятствующий протеканию плазмы к коллектору), который собирал быстрые плазменные электроны при отрицательных потенциалах зонда и «транзитные» электроны — ускоренные из плазмы при положительных потенциалах зонда. Увеличение магнитного поля, вызывающего искривление траекторий этих электронов, снимает необходимость экрана. Плазма создавалась в газовом дуговом источнике ионов (3), который мог работать в магнитном поле и при $H = 0$. Анод и камера были заземлены. Зонды вводились в разрядную камеру источника ионов.

При сравнении результатов, полученных с помощью описываемого метода и метода Лэнгмюра, в случаях одновременного измерения потенциала плазмы при $H = 0$ с помощью одного и того же зонда, было получено вполне удовлетворительное согласие. В большинстве опытов измеренные

величины потенциалов плазмы либо совпадали, либо отличались на несколько десятых вольта. Сближению результатов измерений способствовало следующее: отсутствие относительного сдвига характеристик в результате контактной разности потенциалов, большой угол пересечения зондовой характеристики в полулогарифмическом масштабе, полученный вследствие низкой температуры электронов и плоской конструкции зонда, стабильность горения разряда в источнике ионов и, наконец, одновременность измерений. На рис. 2 для иллюстрации приведены совмещенные по шкале потенциалов две пары кривых, снятые при разных подачах Q аргона в источник ионов.

Таким образом, показано, что простейшая методика непосредственно измерения потенциала плазмы находится в хорошем согласии с теоретическими представлениями о потенциале плазмы.

На рис. 3 приведены зависимости электронного и ионного токов в цепи коллектора от потенциала зонда U_1 , снятые в магнитном поле. Поверхность сетки зонда, параллельная вектору магнитного поля, отстояла от пучка первичных электронов на 4 мм. При стабильном горении разряда разброс в повторных измерениях потенциала плазмы по электронному пику был около $\pm 0,1$ в. Изменение U_2 от 5 до 60 в вызывает увеличение амплитуды пика тока при примерно неизменном положении их вершин по шкале U_1 . Влияние контактной разности потенциалов замечалось при одновременной установке двух, трех зондов с сетками из различных материалов. Однако после некоторого времени работы, по-видимому, в результате образования характерного налета на поверхностях сеток происходила стабилизация и нивелировка состояния их поверхностей.

С помощью новой методики легко и быстро может быть снято распределение потенциала в пространстве, а непосредственное измерение его во многих случаях может быть весьма полезным, так как позволяет отмечать изменение потенциала пространства сразу после того или иного воздействия. Ограничение области применимости метода со стороны высоких плотностей плазмы стирается ростом технических возможностей в изготовлении сеток с малыми размерами отверстий.

Автор благодарен М. А. Леонтовичу и Б. Б. Кадомцеву за полезные обсуждения.

Поступило
4 VIII 1969

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ I. Langmuir, Gen. Elec. Rev., 27, 449 (1924). ² D. Bohm, E. H. Burhop, H. S. Mussey, In: The Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields, N. Y., Chapt. 2, 1949. ³ П. М. Морозов, Б. Н. Маков и др., II Международн. конфер., Женева, P/2303, 4, 444, 1958.