

К ВОПРОСУ О МЕТОДЕ ДЕТЕКТОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

К. И. Кононенко

В статье дается дальнейшее развитие метода детекторных характеристик. Выводится уравнение для детекторной характеристики, которое дает возможность определять потенциал плазмы, температуру и плотность электронов в плазме непосредственно по экспериментальной детекторной характеристике.

Как было показано в [1], детекторные характеристики позволяют легко определять основные параметры газоразрядной плазмы—потенциал, температуру и плотность; кроме того, по экспериментальной детекторной характеристике можно определить функцию распределения электронов по скоростям.

Как известно, зондовая характеристика отрицательно заряженного плоского зонда на основании закона Больцмана может быть представлена в следующем виде:

$$I = \frac{e_0 N v}{4} e^{-eV/kT} = I_0 e^{-e_0 V/kT}, \quad (1)$$

где I —зондовый ток, e_0 —заряд электрона, v —средняя скорость электронов, V —потенциал зонда относительно потенциала плазмы, k —постоянная Больцмана, T —температура электронов, N —плотность плазмы.

Если ограничиться рассмотрением квадратичного детектирования, то для величины детекторного тока будем иметь следующее выражение:

$$\Delta I = \frac{\partial^2 I}{\partial V^2} \left(\frac{V_{\sim}}{2} \right)^2, \quad (2)$$

где V_{\sim} —амплитуда переменного детектируемого напряжения.

Определив вторую производную из (1) и подставив найденное значение в (2), получаем:

$$\Delta I = BNT^{3/2} e^{-e_0 V/kT} V_{\sim}^2, \quad (3)$$

где

$$B = e_0^3 / \sqrt{32k^3 \pi m}. \quad (4)$$

С другой стороны, как показал Драйвестейн [2], функция распределения может быть представлена в виде:

$$\rho \left(\sqrt{2e_0 V/m} \right) = \frac{4m}{e_0^2} V \frac{\partial^2 I}{\partial V^2}. \quad (5)$$

Подставляя сюда значение второй производной из (2), получим:

$$\rho = FV \Delta I, \quad (6)$$

где коэффициент

$$F = 16m/e_0^2 V_{\sim}^2 \quad (7)$$

при построении функции распределения можно считать постоянным, поскольку при снятии детекторной характеристики амплитуда детек-

тируемого напряжения не меняется. Заменяя в выражении (6) значение детекторного тока ΔI в соответствии с формулой (3), получаем функцию распределения в явном виде:

$$\rho = \frac{e_0}{k} \sqrt{\frac{8m}{\pi k}} N T^{-3/2} V e^{-e_0 V/kT}. \quad (8)$$

Эта функция проходит через максимум в точке, где

$$e_0 V_{\rho_m} / kT = 1. \quad (9)$$

Отсюда легко определяется температура электронов

$$T = (e_0/k) V_{\rho_m}, \quad (10)$$

где V_{ρ_m} — потенциал, соответствующий максимуму функции распределения.

Для определения плотности плазмы вычислим максимум функции распределения (8). Пользуясь условием (9) и исключая температуру, найдем, что

$$\rho_m = \sqrt{\frac{8m}{\pi e_0}} \frac{N}{e V_{\rho_m}}.$$

Решая полученное равенство относительно N , получаем формулу для определения плотности плазмы:

$$N = D \rho_m \sqrt{V_{\rho_m}}; \quad D = e \sqrt{\frac{\pi e_0}{8m}} = \text{const}. \quad (11)$$

В полученное выражение вместо потенциала можно ввести температуру. В этом случае формула для плотности плазмы принимает следующий вид:

$$N = D' \rho_m \sqrt{T}; \quad D' = e \sqrt{\frac{\pi k}{8m}} = \text{const}. \quad (12)$$

Таким образом, сняв детекторную характеристику и построив в соответствии с (6) функцию распределения, мы можем при помощи (10) вычислить температуру, а при помощи (11) или (12) определить плотность плазмы. Как было показано в [3,4], метод детекторных характеристик является наиболее точным по сравнению со всеми другими зондовыми методами. Его достоинство заключается в том, что он позволяет экспериментально определять функцию распределения.

В изложенном методе для определения параметров плазмы необходимо сначала по детекторной характеристике строить функцию распределения и только затем по максимуму этой функции определять параметры плазмы. Мы сейчас покажем, что указанные параметры можно определять непосредственно по детекторной характеристике.

Согласно [1], детекторная характеристика достаточно хорошо аппроксимируется при помощи формулы

$$\Delta I = A' V^{1/2} e^{-e_0 V/kT}, \quad (13)$$

где A' — опытная константа. Мы запишем эту формулу в несколько ином виде, а именно:

$$\Delta I = A V^{1/2} e^{-e_0 V/kT} V^2, \quad (14)$$

где A — некоторая новая константа, V_{\sim} — амплитуда переменного детектируемого напряжения. Последняя формула соответствует случаю квадратичного детектирования.

Функция (14) проходит через максимум в точке, где выполняется условие

$$2e_0 V = kT. \quad (15)$$

Из этого условия по потенциалу $V = V_M$, соответствующему максимуму функции детекторного тока, легко определяется температура T . Сравнивая (9) и (15), получаем:

$$V_{\rho_M} = 2V_M. \quad (16)$$

Для определения плотности плазмы вычислим по формулам (3) и (14) значение детекторного тока в максимуме функции распределения:

$$\begin{aligned} \Delta I_{\rho_M} &= BNT^{1/2} e^{-1} V_M^2; \\ \Delta I_{\rho_M} &= AV_{\rho_M}^{1/2} e^{-1} V_M^2. \end{aligned} \quad (17)$$

Приравняв правые части этих выражений, будем иметь:

$$BNT^{-1/2} = AV_{\rho_M}^{1/2}. \quad (18)$$

Исключая температуру при помощи формулы (15) и переходя от V_{ρ_M} к V_M по формуле (16), получим для плотности плазмы следующее выражение

$$N = DV_M^2, \quad (19)$$

где D есть константа, связанная с постоянной A в формуле (14) соотношением

$$D = 16 \sqrt{2\pi m e_0^{-3}} A. \quad (20)$$

Покажем теперь, что опытную константу A вообще можно исключить из рассмотрения. Для этого воспользуемся соотношением (18). Исключая V_{ρ_M} при помощи (9) и решая относительно A , найдем, что

$$A = B \left(\frac{e_0}{k} \right)^{1/2} NT^{-2}. \quad (21)$$

Подставляя полученное значение A в (14) и учитывая (4), будем иметь:

$$\Delta I = \frac{e_0^{1/2}}{k^2 \sqrt{32\pi m}} NT^{-2} V_M^{1/2} e^{-e_0 V_M / kT} V_M^2. \quad (22)$$

Это выражение представляет кривую детекторного тока, в которую не входят никакие опытные константы. Таким образом, мы получили аналитическое выражение для детекторной характеристики в зависимости от основных параметров плазмы: потенциала, температуры и плотности плазмы, а также от величины амплитуды детектируемого напряжения.

Потенциал плазмы входит в (23) через выражение для V по формуле

$$V = V_3 - V_{пл}, \quad (23)$$

где V_3 — потенциал зонда относительно анода, катода или любого другого опорного электрода, $V_{пл}$ — потенциал плазмы. Потенциал плаз-

мы определяется по пересечению детекторной характеристики с осью абсцисс.

Пользуясь выражением (23), определим теперь связь между значениями детекторного тока в максимуме функции распределения и в максимуме функции детекторного тока. Учитывая, что в этих точках

$$\Delta I_M = ANT^{-2} V_M^{1/2} e^{-1/2} V_{\sim}^2 ;$$

$$\Delta I_{\rho_M} = ANT^{-2} V_{\rho_M}^{1/2} e^{-1} V_{\sim}^2 ,$$

получим:

$$\Delta I_M / \Delta I_{\rho_M} = \sqrt{e V_M / V_{\rho_M}} = \sqrt{e/2} \quad (24)$$

(см. (16)).

Покажем теперь, что плотность плазмы можно определять непосредственно по детекторной характеристике, не прибегая к вычислению функции распределения и не пользуясь экспериментальной константой. Для этого в формулу (11) подставим значение ρ_M , пользуясь формулой (6). В результате получим:

$$N = D \rho_M \sqrt{V_{\rho_M}} = DF V_{\rho_M} \Delta I_{\rho_M} \sqrt{V_{\rho_M}} .$$

Учитывая (17) и (24) и переходя от V_{ρ_M} и ΔI_{ρ_M} к значениям этих величин в максимуме функции детекторного тока, будем иметь:

$$n = \frac{4DF}{\sqrt{e}} \Delta I_M V_M^{3/2} .$$

Подставляя значения постоянных коэффициентов, окончательно найдем, что

$$N = M \Delta I_M V_M^{3/2} ; \quad M = 16 V_{\sim}^{-2} \sqrt{2\pi m e e_0^{-3}} . \quad (25)$$

Величину M можно считать постоянной, так как при снятии детекторной характеристики амплитуда переменного детектируемого напряжения V_{\sim} остается неизменной. При других измерениях, когда V_{\sim} будет принимать разные значения, постоянная M также будет изменяться.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Кононенко, Уч. зап. ХГУ, **64**, 6, 191 (1955).
2. M. J. Druyvesteyn, Z. Physik, **67**, 781 (1930).
3. К. И. Кононенко, В. Д. Рутгайзер, Уч. зап. ХГУ, **64**, 6, 199 (1955).
4. В. Д. Рутгайзер, К. И. Кононенко, Уч. зап. ХГУ, **64**, 6, 203 (1955).
5. Г. А. Соболев, Наукові записки Мелітопольського державного педагогічного інститута, **4**, 245 (1957)

Харьковский государственный университет

Поступила в редакцию
5 июня 1959 г.