

К ВОПРОСУ О ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ БОЛЬШОГО ИОННОГО ТОКА

К. Н. Пазин

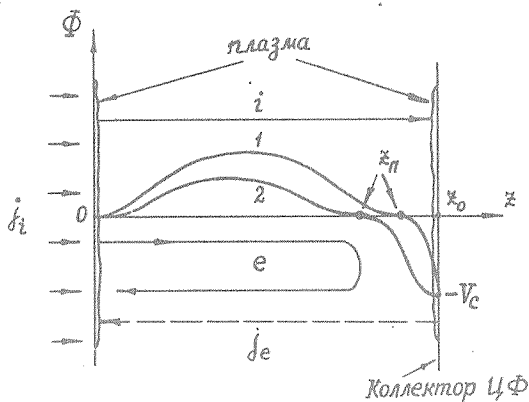
УДК 537.533

Проведены оценки ошибок, которые могут возникнуть при измерении с помощью цилиндра Фарадея ионного тока в десятки килоампер. Показано, что результат измерений может отличаться от истинного значения в несколько раз. Подчеркнута связь между параметрами системы и величиной напряжения смещения, отсекающего электроны.

Один из актуальных вопросов техники генерации сильноточных ионных пучков — измерение ионных токов в десятки и сотни килоампер. Обычно для этого применяют различные модификации цилиндра Фарадея (ЦФ). Здесь, однако, имеются обстоятельства, которые могут приводить к существенному различию между измеренной и действительной величинами тока. Рассмотрим систему (рис. 1), в которой поперечное движение частиц отсутствует (наложено сильное продольное магнитное поле). Известно (см., напр., /1/), что в таких системах ионный пучок, выходя в дрейфовое пространство, увлекает часть электронов из катодной плазмы. Попадая на ЦФ, они создают ток, уменьшающий показания цилиндра по сравнению с истинным значением. Чтобы устранить эту ошибку, на коллектор ЦФ подает /1/ отрицательный по отношению к катоду потенциал, который тормозит электроны и направляет их обратно на катод. Для этого способа "очистки" ионного пучка основным является вопрос о требуемой величине напряжения смещения.

Рассмотрим его на примере стационарного одномерного электронного-ионного потока, движущегося в эквипотенциальном дрейфовом пространстве между катодом и коллектором ЦФ, отстоящими

друг от друга на расстояние z_0 . На рис. 1 показано поведение потенциала Φ в этом промежутке. Электроны проходят от катода до точки поворота z_{II} , где формируется виртуальный катод, и, отразившись от последнего, возвращаются на катод. На участке от z_{II} до z_0 , где поток состоит только из ионов, падает все приложенное напряжение смещения.



Р и с. 1. Схема потоков и распределения потенциала без эмиссии электронов с ЦФ (1) и с эмиссией электронов с ЦФ (2)

В конечном итоге основной интерес для нас представляет зависимость координаты точки поворота z_{II} от приложенного напряжения смещения и других параметров системы. Чтобы ее найти, достаточно рассмотреть лишь участок $z_{II} \leq z \leq z_0$. Поведение электростатического потенциала описывается здесь уравнением, следующим из уравнения Пуассона, стационарного уравнения непрерывности и закона сохранения полной энергии иона,

$$\frac{d^2\varphi}{dz^2} = -(\varphi_g - \varphi)^{-1/2}, \quad (1)$$

с граничными условиями: $\varphi(z = z_{II}) = 0$, $\varphi(z = z_0) = -\varphi_c$ и $d\varphi/dz|_{(z = z_{II})} = 0$, где $\varphi = e\Phi/m_e c^2$, $\varphi_g = eV_g/m_e c^2$, V_g - напря-

жение, которым были ускорены ионы, $\varphi_c = eV_c/m_e c^2$, V_c - напряжение смещения, $\xi^2 = z^2 \pi^2 3/2 (m_i/m_e)^{1/2} (e/m_e c^3) j_i$, j_i - плотность тока ионов, m_e и m_i - массы электрона и иона соответственно.

Первый интеграл уравнения (I) имеет вид:

$$\left(\frac{d\varphi}{dz}\right)^2 = 4 \left[(\varphi_g - \varphi)^{1/2} - \varphi_g^{1/2} \right], \quad (2)$$

а из второго получаем интересующую нас величину $\xi_0 - \xi_{II}$:

$$\xi_0 - \xi_{II} = \frac{2}{3} \left[(\varphi_g + \varphi_c)^{1/2} - \varphi_g^{1/2} \right]^{1/2} \left[(\varphi_g + \varphi_c)^{1/2} + 2\varphi_g^{1/2} \right]. \quad (3)$$

Точные формулы (2), (3) упростим с учетом того, что разумные значения напряжения смещения должны быть существенно меньше напряжения на диоде, то есть $|\varphi|/\varphi_g \ll 1$. Тогда получаем:

$$\left(\frac{d\varphi}{dz}\right)^2 = -2 \frac{\varphi}{\varphi_g^{1/2}}, \quad (4)$$

$$\xi_0 - \xi_{II} = 2^{1/2} \varphi_c^{1/2} \varphi_g^{1/4}, \quad (5)$$

или в размерных величинах:

$$E_0 = - \left. \frac{d\Phi}{dz} \right|_{z=z_0} = 2^{5/4} \pi^{1/2} \frac{m_e c^2}{e} \left(\frac{e j_i}{m_e c^3} \right)^{1/2} \left(\frac{m_i}{m_e} \right)^{1/4} \left(\frac{e V_c}{m_e c^2} \right)^{1/2} \left(\frac{m_e c^2}{e V_g} \right)^{1/4}, \quad (6)$$

$$z_0 - z_{II} = 2^{-1/4} \pi^{-1/2} \left(\frac{m_e c^3}{e j_i} \right)^{1/2} \left(\frac{m_e}{m_i} \right)^{1/4} \left(\frac{e V_c}{m_e c^2} \right)^{1/2} \left(\frac{e V_g}{m_e c^2} \right)^{1/4}. \quad (7)$$

Оценим эти величины при $j_i = 170 \text{ A/cm}^2$ и $V_g = 1 \text{ МВ}$, лежащих в интервале значений, характерных для таких систем /2/:

$$E_0 = 43,5 V_c^{1/2} \text{ кВ/см}, \quad z_0 - z_{II} = 0,39 V_c^{1/2} \text{ мм},$$

где V_c измеряется в киловольтах.

Из этих формул видно, что при напряжениях смещения, не превышающих 1 кВ, точка поворота электронов отстоит от коллектора ЦФ на доли миллиметра. При увеличении напряжения смещения до 10 кВ эта точка отодвигается от коллектора на расстояние порядка миллиметра. Наконец, при напряжениях в десятки кВ электроны из катодной плазмы останавливаются в нескольких миллиметрах от коллектора ЦФ. Интересно также оценить величину электрического поля на коллекторе E_0 . Для тех же значений параметров j_i и V_g получаем $E_0 \sim 40$ кВ/см при $V_c \sim 1$ кВ и $E_0 \sim 100$ кВ/см при $V_c \sim 10$ кВ.

При наличии плазмы на коллекторе, которая образуется в результате бомбардировки ионным пучком, это поле будет создавать ток электронов с ЦФ, порождающий ошибку измерений. Чтобы оценить величину этого тока, воспользуемся описанной выше моделью с учетом ограниченного пространственным зарядом потока нерелятивистских электронов с коллектора. Качественное изменение в поведении потенциала произойдет только на участке $z_{II} \ll z \leq z_0$, поскольку теперь электрическое поле на коллекторе равно нулю (рис. 1). Для наших целей достаточно рассмотреть лишь этот участок, на котором

$$\frac{d^2\varphi}{dz^2} = \frac{j_e}{j_i} (\varphi_c + \varphi)^{-1/2} - \left(\frac{m_i}{m_e}\right)^{1/2} (\varphi_g - \varphi)^{-1/2}, \quad (8)$$

где $\xi^2 = z^2 \pi^2 / 2^{3/2} (e/m_e c^3) j_i$, j_e — плотность тока с коллектора.

Первый интеграл уравнения (8) позволяет найти интересующую нас величину j_e :

$$\frac{j_e}{j_i} = \left(\frac{m_i}{m_e}\right)^{1/2} \frac{(\varphi_g + \varphi_c)^{1/2} - \varphi_g^{1/2}}{\varphi_c^{1/2}}. \quad (9)$$

При $\varphi_c \ll \varphi_g$ ($V_c \ll \bar{V}_g$) выражение (9) можно упростить:

$$\frac{j_e}{j_i} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{m_i}{m_e}\right)^{1/2} \left(\frac{V_c}{V_g}\right)^{1/2}.$$

Количественные результаты получим для протонов. При $V_c' = 10$ кВ и $V_g = 0,5$ МВ имеем $j_e'/j_i \approx 3$, а при том же напряжении смещения и $V_g = 1$ МВ получаем $j_e'/j_i \approx 2$. Эти оценки показывают, что при $V_g \sim 1$ МВ и $V_c \sim 10$ кВ показания ЦФ могут в несколько раз отличаться от истинного значения ионного тока. Следовательно, для обеспечения точности измерений необходимо принимать специальные меры подавления электронного тока с коллектора ЦФ. Одна из возможностей состоит, например, в "замагничивании" электронов коллекторной плазмы.

Поступила в редакцию
21 октября 1981 г.

Л и т е р а т у р а

1. R. N. Sudan et al., Journ. Appl. Phys., 48, 1449 (1977).
2. В. М. Быстрицкий, Изв. ВУЗов, сер. "Физика", № 10, 83 (1979).