

Краткие сообщения

04;12

Использование двойного изолированного зонда для исследования потоков заряженных частиц в плазме

© В.Я. Мартенс

Ставропольский государственный технический университет,
355038 Ставрополь, Россия

(Поступило в Редакцию 27 мая 1997 г.)

Показано, что существование тока во внешней цепи двойного изолированного зонда при отсутствии электрического смещения между его электродами свидетельствует о наличии потока заряженных частиц в плазме. Определяя направление и величину тока во внешней цепи зонда при различных его положениях в исследуемой системе, можно определить сорт частиц, составляющих поток в плазме, его направление и расходимость, а также получить информацию о распределении плотности тока по сечению пучка в плазме. Представлены результаты измерений параметров потока электронов в плазме.

Известно использование двойного изолированного зонда для определения температуры электронов и концентрации плазмы [1]. В данной работе показаны его возможности для исследования потоков заряженных частиц в плазме.

В [2] рассмотрено поведение изолированного электрода, помещенного в квазинейтральную систему плазма–электронный поток. Если этот электрод разделить на две части так, чтобы поток попадал только на одну часть, то между этими частями, соединенными через внешнюю электрическую цепь, будет протекать ток (рис. 1) при общем токе, равном нулю. Рассмотрим, какую информацию о потоке заряженных частиц могут дать измерения тока во внешней цепи.

Назовем условно ту часть электрода, на которую попадает электронный поток, первым электродом, а другую часть — вторым электродом. Уравнения баланса токов на первый и второй электроды можно записать следующим образом:

$$i_{ip1} - i_{ep1} - i_{eb}(1 - \sigma) + i = 0, \quad i_{ip2} - i_{ep2} - i = 0, \quad (1), (2)$$

где i_{ip1} , i_{ep1} — токи поступающих на первый электрод плазменных (тепловых) ионов и электронов; i_{ip2} , i_{ep2} — аналогичные токи на второй электрод; i_{eb} — ток электронов пучка, оседающих на первом электроде; σ — коэффициент вторичной эмиссии; i — ток во внешней цепи.

С учетом (1) и (2) выражение для тока во внешней цепи можно представить в виде

$$i = \frac{1}{2}[i_{ip2} - i_{ep2} - i_{ip1} + i_{ep1} + i_{eb}(1 - \sigma)]. \quad (3)$$

Проведя аналогичные рассуждения для системы плазма–ионный поток, получим

$$i = \frac{1}{2}[i_{ip2} - i_{ep2} - i_{ip1} + i_{ep1} - i_{ib}(1 + \gamma)], \quad (4)$$

где i_{ib} — ток ионов пучка, оседающих на первом электроде; γ — коэффициент ионно-электронной эмиссии.

Таким образом, ток во внешней цепи зависит от токов на оба электрода, а они, как показано в [2], определяются параметрами плазмы, потока и материалом электродов. При отсутствии потока ($i_{eb} = 0$ или $i_{ib} = 0$) сумма остальных составляющих тока внешней цепи также равна нулю, так как для электродов, находящихся в квазинейтральной плазме под плавающим потенциалом, $i_{ip1} = i_{ep1}$ и $i_{ip2} = i_{ep2}$. Из этого следует, что само существование тока во внешней цепи свидетельствует о наличии потока заряженных частиц в плазме.

Если бы при наличии потока концентрация плазмы вблизи одинаковых по размеру электродов оставалась одинаковой, то ток во внешней цепи был бы равен

$$i = \frac{1}{2}i_{eb}(1 - \sigma) \quad (5)$$

или

$$i = -\frac{1}{2}i_{ib}(1 + \gamma), \quad (6)$$

так как $i_{ip1} = i_{ip2}$ и $i_{ep1} = i_{ep2}$.

В реальной ситуации из-за ионизации газа потоком концентрация плазмы вблизи первого электрода может превышать концентрацию вблизи второго электрода, поэтому, как следует из (3) и (4), ток во внешней цепи по модулю будет ниже, чем величины, определяемые выражениями (5) или (6). Однако направление тока во внешней цепи сохранится, и это может быть использовано для определения знака заряда частиц, составляющих поток. На рис. 1 показано направление тока во внешней цепи для электронного потока в плазме. Для потока положительных ионов в плазме направление тока i будет противоположным.

Если заранее неизвестны сорт и энергия частиц, составляющих поток, то электроды следует выполнить из

материала у которого максимальное значение коэффициента вторичной эмиссии меньше единицы. В противном случае при наличии в плазме электронного потока направление тока i может измениться на противоположное из-за превышения тока вторичной эмиссии над током i_{eb} (знак коэффициента $(1-\sigma)$ в выражении (5) изменится), что может быть ошибочно расценено как существование ионного потока в плазме.

Следует заметить, что увеличение плотности тока пучка вызывает рост тока во внешней цепи, и хотя зависимость между ними в общем случае нелинейная, тем не менее максимуму плотности тока будет соответствовать максимум тока во внешней цепи. Это может быть использовано для изучения распределения плотности тока по сечению пучка в плазме. Кроме того, величина тока во внешней цепи зависит от положения зонда относительно направления распространения потока. Ток i максимален, если поток оседает только на одном электроде (рис. 1), и равен нулю, если попадающие на зонд частицы потока равномерно распределяются на оба электрода. Для реализации последней ситуации двойной зонд, показанный на рис. 1, необходимо повернуть на 90° вокруг оси, перпендикулярной направлению распространения потока. Это обстоятельство может быть использовано для определения направления потока заряженных частиц в плазме и его расходимости.

Для экспериментальной проверки использовался двойной зонд, представляющий собой две серебряные пластины каждой размером 3×3 мм, разделенные керамическим изолятором. Зонд помещался в формирователь (металлическая труба с внутренним диаметром $2r_0 = 110$ мм) электронной пушки [3]. Плазма в формирователе генерировалась расходящимся пучком электронов, инжектируемых через отверстие диаметром 4 мм из отражательного разряда с полым катодом вдоль оси формирователя. Зонд устанавливался на расстоянии 5 см от отверстия инжекции и мог перемещаться в радиальном направлении, причем плоскости его электродов были перпендикулярны оси формирователя. Давление воздуха в формирователе составляло $\sim 10^{-2}$ Па, концентрация плазмы на оси $\sim 10^8$ см $^{-3}$, энергия инжектируемых электронов ~ 100 эВ, ток пучка составлял 0.4 от

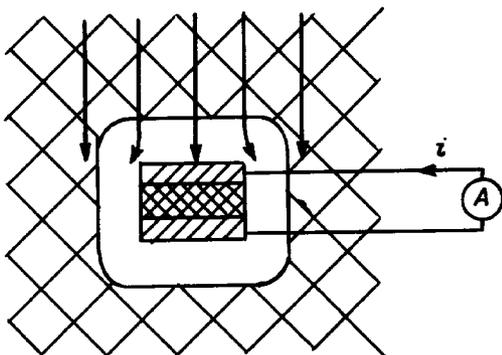


Рис. 1. Схема двойного изолированного зонда.

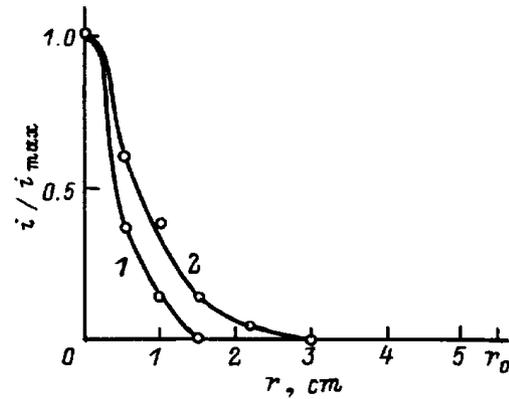


Рис. 2. Зависимости тока во внешней цепи двойного изолированного зонда от его радиального положения в формирователе. I_d , мА: 1 — 100, 2 — 200.

тока разряда I_d , который в экспериментах изменялся от 100 до 200 мА. При этом ток i во внешней цепи двойного зонда достигал на оси формирователя нескольких десятков μ А.

На рис. 2 представлены нормированные зависимости тока во внешней цепи зонда от его радиального положения в формирователе. Они свидетельствуют о неравномерном распределении плотности тока по сечению пучка с максимумом плотности тока на оси формирователя. Увеличение разрядного тока приводит к увеличению диаметра пучка от 3 до 6 см в плоскости измерений за счет увеличения его расходимости. Полученная в этих экспериментах информация об электронном пучке в плазме совпадает с результатами исследований, проведенных ранее в этой же системе другими методами [4,5].

В области между электронным пучком и стенками формирователя $i = 0$ (рис. 2). Чтобы доказать, что в этой области существует плазма, но нет электронного пучка, снимались вольт-амперные характеристики одиночных зондов, в качестве которых использовались первый и второй электроды двойного зонда. Зондовые характеристики первого и второго электродов включали электронную и ионную ветви и полностью совпадали для $I_d = 100$ мА при $r > 1.5$ см и для $I_d = 200$ мА при $r > 3$ см. При меньших расстояниях от оси электронный и ионный токи на верхний электрод, обращенный в сторону инжекции пучка, превышали соответствующие токи на второй электрод.

Таким образом, определяя направление и величину тока во внешней цепи двойного зонда при различных его положениях в исследуемой системе, можно определить сорт частиц, составляющих поток в плазме, его направление и расходимость, а также получить информацию о распределении плотности тока по сечению пучка в плазме. Кроме того, по потенциалу зонда можно судить об энергии потока [2]. Для предлагаемых исследований присущи все преимущества изолированного зонда: малое

возмущение исследуемой системы из-за малости отбираемых токов, возможность применения в нестационарной плазме.

Зонд может быть применен для обнаружения потока заряженных частиц в плазме, измерения его параметров, а также исследования динамики пучка при взаимодействии его с газом и плазмой.

Данная работа была проведена при содействии Международной соросовской программы образования в области точных наук (ISSEP), грант № 904d, 1997 г.

Список литературы

- [1] *Ховатсон А.М.* Введение в теорию газового разряда. М.: Атомиздат, 1980. С. 131.
- [2] *Мартенс В.Я.* // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 6. С. 70–76.
- [3] *Крейндель Ю.Е., Мартенс В.Я., Съедин В.Я.* и др. // ПТЭ. 1982. № 4. С. 178–180.
- [4] *Груздев В.А., Крейндель Ю.Е., Мартенс В.Я.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1979. Т. 43. № 9. С. 1883–1886.
- [5] *Мартенс В.Я., Ремпе Н.Г.* // Тез. докл. V Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1984. Ч. 2. С. 195–197.