

Анализ возможности измерения потенциала плазмы в высокочастотном разряде низкого давления плавающим зондом

А. П. Ойлер^{1,2} и Г. Д. Лизякин¹

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

² Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер., 9, Долгопрудный 141701, Россия

E-mail: andrey_oiler@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2019 г.

Аннотация. В данной работе приводится анализ возможности измерения потенциала плазмы в высокочастотном разряде низкого давления при помощи плавающего зонда. Анализируется эквивалентная схема измерений, оценивается импеданс слоя объемного заряда вокруг зонда, определяется погрешность измерений зондом и рассчитываются параметры фильтров для уменьшения погрешности измерений при давлении буферного газа (аргона) $P = 0.5\text{--}5$ мТорр, магнитной индукции $B = 0.5\text{--}2$ кГс, напряженности электрического поля в плазме $E = 1\text{--}100$ В/см и концентрации электронов $n = 10^9\text{--}10^{12}$ см⁻³. <https://doi.org/10.33849/2019212>

1. ВВЕДЕНИЕ

При исследовании высокочастотного (ВЧ) разряда низкого давления в магнитном поле часто возникает задача измерения потенциала плазмы [1, 2]. Из-за наличия магнитного поля стандартный метод измерения одиночным зондом Ленгмюра неприменим. Одним из наиболее распространенных методов измерения потенциала плазмы в присутствии магнитного поля является измерение при помощи плавающего зонда. Однако при некоторых давлениях погрешность измерений таким методом может составлять сотни вольт [3–5]. Природа данной погрешности состоит в том, что импеданс слоя объемного заряда, который формируется вблизи зонда, превышает импеданс между зондом и конструктивными элементами. Проще говоря зонд перестает быть “плавающим”. Поэтому, применяя данную методику, необходимо очень тщательно оценивать как параметры плазмы, так и параметры зонда и измерительной схемы.

Самым простым и достаточно эффективным способом уменьшения погрешности измерения потенциала в плазме ВЧ-разряда является установка блокировочного элемента в измерительный зонд. Однако погрешность измерений сильно зависит от номинала и типа блокировочного элемента в цепи измерительного прибора. Кроме того, параметры фильтра также влияют и на измерение температуры электронов с использованием двойного зонда [6, 7].

2. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

Слой положительного объемного заряда между зондом (точка P_r на рисунке 1) и невозмущенной плазмы (точка P) можно представить в виде некоего импеданса Z_s . Падение напряжения на этом элементе нелинейно зависит от тока, протекающего через него. Сам зонд имеет неустраняемую паразитную емкость C_{str} , “располагающуюся” между электротехническими компонентами зонда (соединительными проводами, элементами блокировочной схемы) и его металлическим корпусом. Поэтому ВЧ-пробка с импедансом Z_b должна располагаться как можно ближе к измерительной части зонда для уменьшения этой паразитной емкости.

Сама ВЧ-пробка есть последовательный колебательный контур (RLC) с резонансной частотой, почти

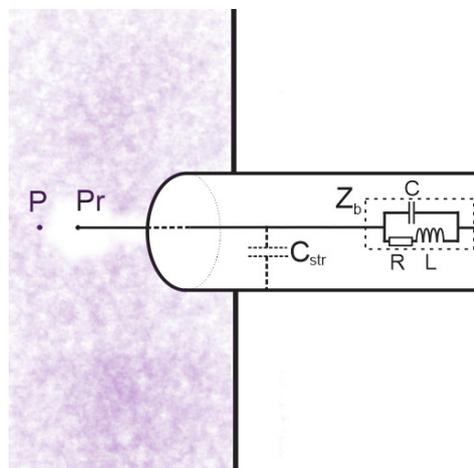


Рисунок 1. Схема измерительной части зонда.

совпадающей с частотой генератора, составляющей примерно 5 МГц.

Потенциал плазмы относительно земли можно представить в виде $V_p = \bar{V}_p + \Delta V_p \sin \omega t$, а потенциал зонда: $V_{pr} = \bar{V}_{pr} + \Delta V_{pr} \sin \omega t$.

Здесь \bar{V}_p — постоянная часть разложения колебаний потенциала в плазме, невозмущенной зондом, ΔV_p — амплитуда переменной части. Аналогично \bar{V}_{pr} — постоянная часть напряжения зонда, ΔV_{pr} — амплитуда переменной (рисунок 2), C — конденсатор, с которого снимаются показания вольтметром. Для того, чтобы вся плазма успевала реагировать на изменения электрического поля, нужно, чтобы плазменная частота и электронов и ионов была больше частоты генератора. Из этого условия следует, что концентрация электронов должна быть много больше 2×10^{10} см⁻³.

Паразитную емкость между фильтром и внешней металлической трубкой можно оценить по формуле цилиндрического конденсатора. Для характерных размеров системы: длина и радиус фильтра 2 см и 3 мм соответственно и внутренний радиус металлической трубки 4 мм, паразитная емкость составляет 1–10 пФ. Учитывая, что эта емкость “подключена” параллельно блокировочному элементу, то не имеет смысла делать блоки-

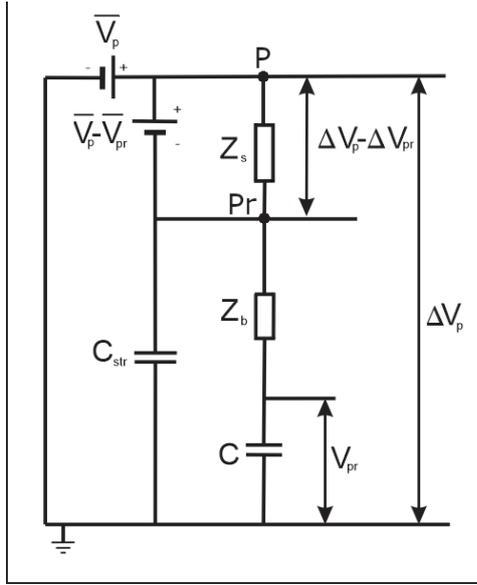


Рисунок 2. Принципиальная схема измерений [3].

ровочный импеданс много больше импеданса паразитной емкости. Для частоты 5 МГц и паразитной емкости 1 пФ импеданс этой емкости составляет примерно 30 кОм.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ ОТ ПОТЕНЦИАЛА ЗОНДА

Считая, что длина свободного пробега электронов больше толщины призондового слоя, можно рассчитать концентрацию электронов по бальцмановскому распределению. Получим плотность тока электронов на зонд:

$$|j_e| = \frac{en_e \bar{v}_e}{4} \exp\left(-\frac{e(V_p - V_{pr})}{kT_e}\right), \quad (1)$$

где средняя скорость находится как $\bar{v}_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m}}$. Учитывая, что ионы входят в слой с бальмановскими скоростями плотность ионного тока имеет вид (\bar{e} — число e):

$$j_i = en_B u_B = en_e \sqrt{\frac{kT_e}{M\bar{e}}}. \quad (2)$$

Приравняем плотности токов (1) и (2) и проинтегрируем по периоду

$$\int_0^{2\pi} j_i d(\omega t) = \int_0^{2\pi} |j_e| d(\omega t). \quad (3)$$

После некоторых математических преобразований уравнения (3) получим:

$$\bar{V}_p - \bar{V}_{pr} = |V_f| + \frac{kT_e}{e} \ln I_0\left(\frac{e(\Delta V_p - \Delta V_{pr})}{kT_e}\right). \quad (4)$$

Первое слагаемое в правой части уравнения (4) представляет из себя модуль плавающего потенциала $V_f = -\frac{kT_e}{2e} \ln\left(\frac{M\bar{e}}{2\pi m e}\right)$, а второе можно разложить при малых значениях аргумента $x = \frac{e(\Delta V_p - \Delta V_{pr})}{kT_e}$ ($I_0(x)$ —

функция Бесселя):

$$\bar{V}_p - \bar{V}_{pr} = |V_f| + \frac{kT_e}{e} \ln I_0(x) \approx |V_f| + \frac{kT_e}{e} \frac{x^2}{4}. \quad (5)$$

Если выразить температуру в вольтах, то (5) можно записать таким образом:

$$\bar{V}_p - \bar{V}_{pr} = |V_f| + \frac{T_e}{4} \left(\frac{\Delta V_p - \Delta V_{pr}}{T_e}\right)^2, [T_e] = V. \quad (6)$$

Найдем относительную погрешность измерения потенциала плазмы:

$$\varepsilon_{V_p} = \frac{\bar{V}_p - \bar{V}_{pr} - |V_f|}{\bar{V}_p} = \frac{\bar{V}_p}{4T_e} \left(\frac{\Delta V_p - \Delta V_{pr}}{\bar{V}_p}\right)^2. \quad (7)$$

4. ОЦЕНКА ИМПЕДАНСА СЛОЯ

Умножив выражение (1) на площадь поверхности зонда A_p получим полный электронный ток, текущий через зонд:

$$I_e = -A_p \frac{en_e \bar{v}_e}{4} \exp\left(-\frac{e(V_p - V_{pr})}{kT_e}\right). \quad (8)$$

Тогда выполнено:

$$\frac{1}{Z_s} = \frac{dI_e}{dV_p} = -I_e \frac{e}{kT_e} = I_i \frac{e}{kT_e}. \quad (9)$$

Откуда, используя выражение (2), получим:

$$Z_s = \frac{kT_e}{eI_i} = \frac{\sqrt{M\bar{e}kT_e}}{A_p e^2 n_e}. \quad (10)$$

Как видно, сопротивление слоя обратно пропорционально концентрации электронов. При $T_e = 5$ эВ скорость ионов аргона составляет 2.1 км/с и получается импеданс слоя порядка 10 кОм при концентрации электронов $n_e = 10^{12}$ см⁻³.

Толщину слоя можно оценить по формуле $h \approx \sqrt{\frac{8}{9} d \left(\frac{e(\bar{V}_p - \bar{V}_{pr})}{kT_e}\right)^{0.75}}$ [8], где d — радиус Дебая $d = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi e^2 n_e}}$. Для напряжения на слое в 26 В (фактически плавающий потенциал), температуре электронов 5 эВ и концентрации электронов 10^{12} см⁻³ получим $d = 17$ мкм и $h = 54$ мкм.

Для оценки величины ΔV_p нужно оценить величину напряженности невихревого электрического поля на слое. На индуктор, при помощи которого генерируется плазма, падает напряжение порядка 30 кВ. Если вводить зонд в полуметре от индуктора, то тогда напряженность можно оценить как 600 В/см. Тогда $\Delta V_p = 3.24$ В. С другой стороны, величину переменного напряжения на слое можно записать как:

$$\Delta V_p - \Delta V_{pr} = I_i Z_s = \frac{\Delta V_p Z_s}{|Z_\Sigma + Z_s|}, \quad (11)$$

где $Z_\Sigma^{-1} = Z_b^{-1} + i\omega C_{str}$.

Тогда в области частот, где $Z_b > \frac{1}{\omega C_{str}}$, можно оценить погрешность измерений зондом (при $\bar{V}_p = 100$ В)

по формуле (7):

$$\varepsilon_{V_p} < 8 \cdot 10^{-4}.$$

В следующем пункте рассмотрим, в каких областях частот импеданс катушки превосходит импеданс паразитной емкости.

5. ВЧ-ФИЛЬТР

Запишем формулу импеданса для последовательного колебательного контура:

$$Z_b = \frac{1}{i\omega C} (i\omega L + R) \Rightarrow$$

$$|Z_b| = \sqrt{\frac{(\omega L)^2 + R^2}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (RC\omega)^2}}. \quad (12)$$

В данной формуле для увеличения импеданса контура можно либо увеличивать индуктивность (что эквивалентно уменьшению емкости, т.к. нужно поддерживать резонансную частоту постоянной), либо увеличивать сопротивление. Таким образом для контура нужно взять либо катушку с большой индуктивностью, либо резистор с большим сопротивлением, а паразитная индуктивность резистора обеспечит резонансное поведение элемента. Если выбрать резистор, то он будет уменьшать как постоянный, так и переменный ток. Однако для измерения потенциала требуется сохранить постоянный ток. Поэтому в качестве ВЧ-пробки была выбрана индуктивность. Также следует учитывать, что частота генератора может изменяться в связи с изменением плазменной нагрузки. Поэтому помимо того, что резонансный контур должен быть настроен на конкретную частоту, он должен в диапазоне 0.5 МГц также иметь высокое значение импеданса. На рисунке 3 показана АЧХ колебательного контура, состоящего только из катушки индуктивности 220 мкГн (с собственной паразитной емкостью) и контура, параметры которого выбраны, опираясь лишь на резонансную частоту генератора ($L = 4.7$ мкГн, $C = 220$ пФ).

В одной партии промышленно произведенных индуктивностей всегда существует разброс резонансных характеристик. Поэтому для подбора подходящих экземпляров была собрана схема, состоящая из низкоиндуктивного резистора сопротивлением 250 Ом, исследуемой катушки, осциллографа и генератора переменного напряжения (рисунок 4). Для расчета импеданса

использовалась формула: $z = \sqrt{1 + \left(\frac{U_p}{U_R}\right)^2 - 2\frac{U_p}{U_R} \cos(\psi)}$, где U_p — напряжение питания, U_R — напряжение на катушке, ψ — фаза между напряжением питания и напряжением на резисторе.

Важно отметить, что если проводить измерения вне корпуса зонда, то будет сниматься зависимость импеданса только катушки, без влияния паразитной емкости C_{str} . Поскольку паразитная емкость C_{str} и емкость

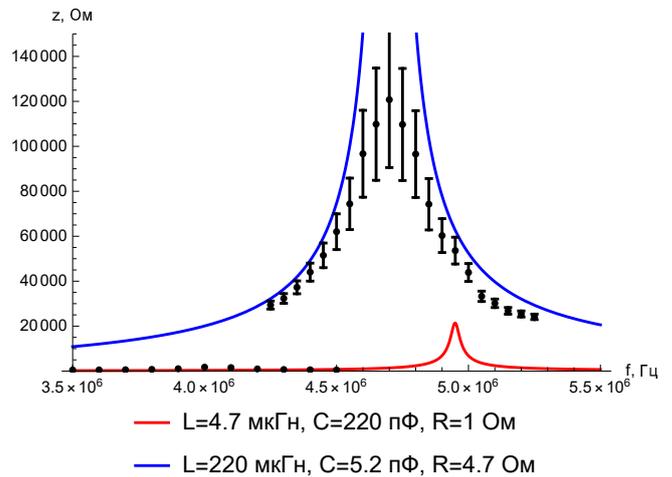


Рисунок 3. Импеданс катушки $L = 220$ мкГн с частотой собственного резонанса близкой к 5 МГц и контура, параметры которого выбирались, ориентируясь только на частоту генератора ($L = 4.7$ мкГн, $C = 220$ пФ).

контура C соединены параллельно, то тогда

$$Z_{\Sigma} = \frac{1}{i\omega C_{\Sigma}} (i\omega L + R). \quad (13)$$

И модуль суммарного импеданса будет найден в виде:

$$|Z_{\Sigma}| = \sqrt{\frac{(\omega L)^2 + R^2}{(1 - \omega^2 LC_{\Sigma})^2 + (RC_{\Sigma}\omega)^2}}. \quad (14)$$

Как можно видеть, резонансная частота получившегося контура будет меньше. Например, у авторов данной статьи при помещении фильтра в конструкцию зонда резонансная частота упала до 3.3 МГц.

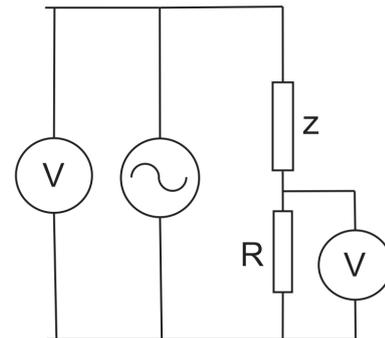


Рисунок 4. Схема измерений резонансной частоты колебательного контура.

6. ВЫВОДЫ

В данной работе был произведен анализ влияния высокочастотного колебания потенциала плазмы на измерения потенциала плазмы плавающим зондом. Показано, что в качестве блокировочного элемента целесообразно использовать катушку индуктивности с собственной резонансной частотой близкой к частоте генератора плазмы. Определено, что блокировочные элементы в ви-

де катушек имеют достаточный импеданс для уменьшения погрешности измерения потенциала плазмы. Для концентрации плазмы выше 10^{12} см⁻³ параметры фильтра могут быть выбраны следующими ($L = 220$ мкГн, $C = 5.2$ пФ, $R = 4.7$ Ом). При помощи оценки импеданса призондового слоя и паразитной емкости схемы оценена относительная погрешность измерения потенциала плазмы. Данные результаты применимы при следующих условиях:

1. Длина свободного пробега электрона больше толщины призондового слоя;
2. Концентрация электронов должна быть много больше 10^{10} см⁻³;
3. Отклонения потенциала плазмы от потенциала зонда считаются малыми, то есть удовлетворяют неравенству $\frac{e(\Delta V_p - \Delta V_{pr})}{kT_e} \ll 1$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liziakin G, Gavrikov A, Usmanov R, Timirkhanov R and Smirnov V 2017 *AIP Adv.* **7** 125108
2. Murzaev Y, Liziakin G, Gavrikov A, Timirkhanov R and Smirnov V 2019 *Plasma Sci. Technol.* **21** 45401
3. Райзер Ю П, Шнейдер М Н и Яценко Н А 1995 *Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения* (М. Изд-во МФТИ)
4. Яценко Н А 1992 *Инж. физ. ж.* **62** 739
5. Яценко Н А 1981 *ЖТФ* **51** 1195
6. Chen F F 2012 *Plasma Sources Sci. Technol.* **21** 55013
7. Sudit I D and Chen F F 1994 *Plasma Sources Sci. Technol.* **3** 162
8. Райзер Ю П 2009 *Физика газового разряда. 3-е изд.* (Долгопрудный: Издательский дом "Интеллект")