

Работа 3

ЗОНДОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ

Цель: ознакомление с зондовым методом экспериментального определения параметров плазмы тлеющего разряда и измерение зондовой вольт-амперной характеристики с последующим расчетом основных параметров плазмы.

ВВЕДЕНИЕ

Для исследований разряда главные задачи состоят в определении распределения электрических потенциалов в пространстве и основных параметров «холодной» плазмы – плотности электронов n_e и их температуры T_e (в общем случае – функции распределения $f_e(v)$). При определенных условиях эти задачи решает зондовый метод, развитый Ленгмюром. Метод позволяет непосредственно находить локальные характеристики плазмы, в чем состоит его особая ценность.

Плазма – это ионизованный газ, в котором концентрация электронов n_e равна концентрации положительных ионов n_+ . Согласно определению, введенному Ленгмюром, ионизованный газ называется плазмой, если дебаевский радиус экранирования – расстояние, на котором поле заряженной частицы эффективно экранируется соседними частицами, – мал по сравнению с другими характерными расстояниями разрядного промежутка.

Плазма газового разряда существенно неравновесна. Составляющие ее заряженные частицы постоянно находятся в ускоряющем электрическом поле. Приобретенная от поля средняя кинетическая энергия электронов в плазме может принимать значения, во много раз превышающие среднюю энергию тяжелых частиц газа. Термически неравновесная плазма поддерживается за счет энергии проходящего через плазму разрядного тока. При снятии внешнего электрического поля происходит деионизация плазмы.

Электроны и ионы в плазме имеют определенные функции распределения. Кинетической энергии частиц, в случае максвелловского распределения, сопоставляются соответствующие температуры T_e и T_+ . Температура электронного газа, даже когда распределение не в точности максвелловское, характеризует энергетическое состояние электронов в плазме.

В плазме, ограниченной стенками, наблюдается определенное распределение потенциала вдоль диэлектрической оболочки и происходит дипольная (амбипольная)

ная) диффузия зарядов к стенкам, приводящая к появлению радиальной напряженности электрического поля. Поэтому различным точкам в пространстве отвечают различные значения потенциала плазмы $U_{\text{п}}$.

Метод холодных зондов является хорошо известным способом экспериментального определения пространственного распределения параметров плазмы.

При зондовом исследовании в определенное место плазмы вводится электрод, на который подаются различные потенциалы. Это металлический проводник, почти до конца покрытый изоляцией. Оголенной поверхности зонда придают разные формы: плоскую, цилиндрическую, шарообразную. Потенциал зонда, задаваемый источником напряжения, фиксируется относительно опорного электрода – анода и катода. Размеры зонда выбираются минимальные, и ток, отбираемый зондом из плазмы, должен быть во много раз меньше основного дрейфового тока. Это обеспечивает наименьшее возмущение плазмы в области измерения.

Простота эксперимента и его технических средств являются достоинствами зондового метода. Недостаток его – в сложности теории, с помощью которой из данных измерений извлекаются характеристики плазмы. При измерении какой-нибудь величины всегда следует стремиться к тому, чтобы в основе метода лежала простая, не вызывающая сомнений теория. В этом отношении зондовый метод работает с достаточной надежностью в случае разреженного газа, когда длина свободного пробега частиц больше характерных размеров зонда и возмущенной области вокруг него.

Работа заключается в определении токов, протекающих через зонд, и приложенных к нему напряжений – зондовой ВАХ.

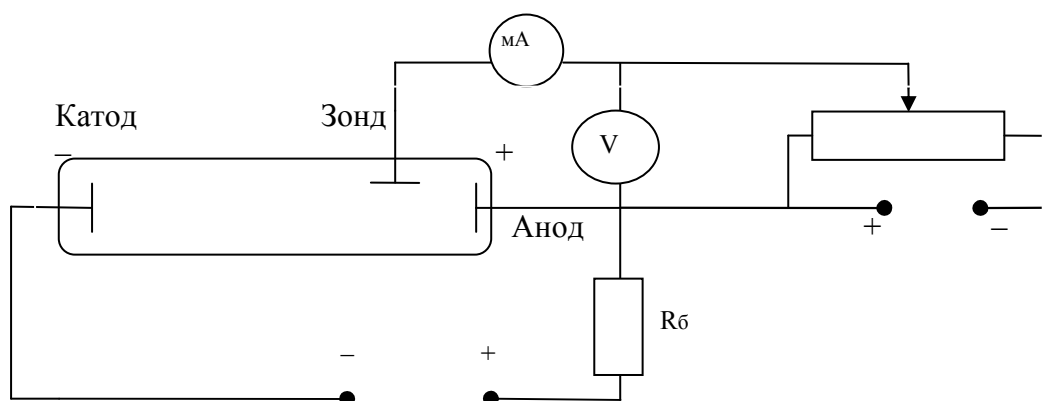


Рис. 1 Принципиальная схема измерений зондовой ВАХ

Схема измерений изображена на рис.1. В данном случае зондовый ток замыкается через анод, поэтому полярность источника напряжения для зонда выбрана так, чтобы потенциал зонда был промежуточным между потенциалами анода и катода, как в плазме. В схеме эксперимента по снятию характеристик холодного зонда в электрическую цепь газоразрядного прибора необходимо вводить балластное сопротивление для задания тока разряда и предотвращения выхода из строя прибора и источника напряжения. Ток разряда должен обеспечивать поддержание в приборе самостоятельного тлеющего разряда и формирование положительного столба разряда, плазма которого исследуется зондовым методом. Ток разряда выбирается из условия равенства величины плотности тока на электродах порядка $0,5 \text{ mA/cm}^2$.

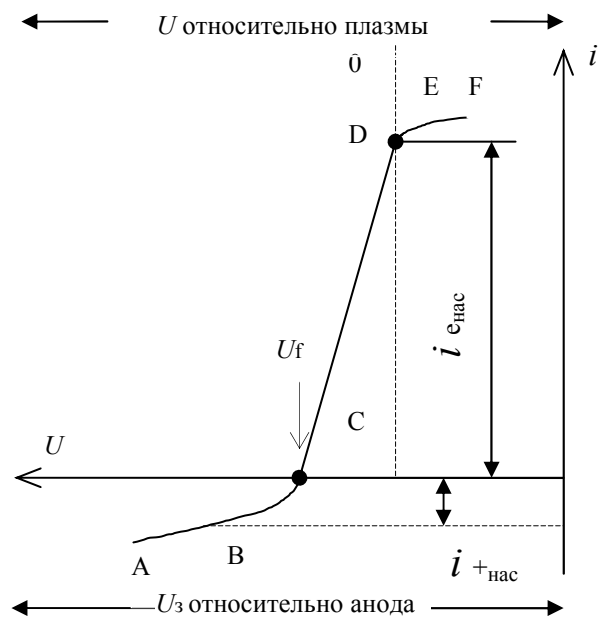


Рис.2. Идеализированная зондовая ВАХ

Потенциал зонда складывается из двух величин: $U_z = U_n + U$, где U – разность потенциалов между плазмой и зондом. ВАХ зонда, получаемый при варьировании величины U_z , показана на рис.2.

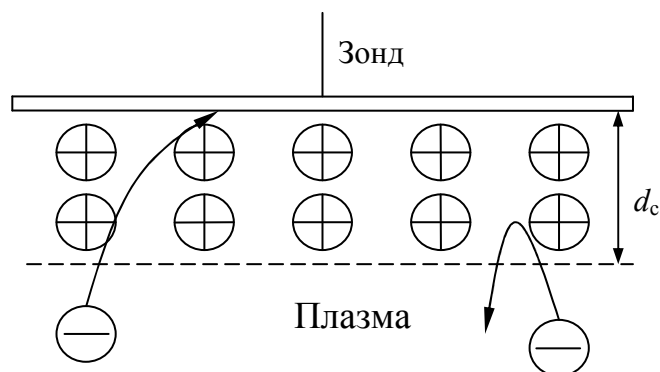


Рис.3. Зонд в плазме

Качественная интерпретация ВАХ заключается в следующем. При введении заряженного металлического тела – зонда в плазму (рис.3) происходит процесс поляризации. Около зонда образуется слой ионов, общий заряд которых равен отрицательному заряду зонда. За пределами расположена невозмущенная плазма. Слой объемного заряда образуется движущимися ионами, которые дают ионную составляющую зондового тока. На зонд проникает и некоторое количество быстрых, «энергичных», электронов, преодолевающих тормозящее поле перед зондом.

При большом отрицательном потенциале на зонде преобладает ток положительных ионов, определяемый параметрами плазмы и мало зависящий от потенциала зонда (см. рис.2, *AB*). По мере уменьшения U_z , электроны будут падать на зонд во все возрастающем числе. В точке *C* собираемые зондом электроны компенсируют ионный ток, $I_z = 0$. В силу высокой энергетичности электронов плазмы выравнивание составляющих зондового тока происходит при некотором отрицательном потенциале U_f . Такой потенциал («плавающий») приобретает помещенное в плазму изолированное тело. При дальнейшем снижении U_z общий ток I_z резко увеличивается за счет электронной составляющей. В точке *D* электронный ток достигает максимума. Далее зависимость приобретает иную закономерность, что связано с изменением знака потенциала зонда относительно плазмы. Теперь ионы отталкиваются зондом, и в точке *E* ионный ток спадает до нуля. В области *EF* полный ток почти постоянен: зонд здесь собирает все доступные электроны.

Толщина объемного слоя d_c возрастает при увеличении приложенной разности потенциалов между зондом и плазмой. Поведение слоя очень похоже на действие вакуумного диода в режиме ограничения тока пространственным зарядом. В областях насыщения *AB* и *EF* плотность тока на зонд будет описываться соотношением

$$j = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{U^{3/2}}{d_c^2},$$

называемым законом Чайлда-Ленгмюра или «законом трех вторых». Заряд e , масса m и температура T относятся к ионам или электронам в зависимости от ситуации. Это уравнение определяет значение d_c . Следует отметить, что данная теория применима к слою зонда в случае, когда d_c меньше средней длины свободного пробега частиц. Электроны и ионы движутся как в вакууме, без столкновений. Обычно это условие выполняется при $p < 10^{-1} - 1$ торр. Определить толщину слоя d_c можно визуальным образом, так как в этом случае не происходит возбуждения и ионизация атомов, и слой темнее окружающей его плазмы из-за отсутствия свечения возбуждения и рекомбинации.

Анализ ВАХ дает информацию о потенциале плазмы у зонда, температуре T_e и плотности n_e электронов.

На участке характеристики BD электроны, достигающие зонда, должны преодолеть тормозящее поле. Для этого скорость электрона должна удовлетворять неравенству $mv_x^2/2 > eU$, где v_x – составляющая скорости по нормали к поверхности зонда. При максвелловском распределении скоростей электронов доля высокоэнергетических частиц определяется выражением

$$(n_e)_U = n_e \exp(-eU/kT_e).$$

Отсюда получается, что плотность электронного тока на зонд, направленного против замедляющего потенциала U , выражается формулой

$$j_e(U) = j_{e_{хаот}} \exp(-eU/kT_e),$$

где $j_{e_{хаот}}$ – плотность хаотического тока в плазме.

Домножая выражение для тока на площадь зонда S и логарифмируя, получаем

$$\ln i_e = \ln i_{e_{нас}} - eU/kT_e,$$

где i_e – ток электронов на зонд при условии, что зонд имеет отрицательный потенциал U относительно плазмы; $i_{e_{нас}}$ – электронный ток насыщения через поверхность S . Ток i_e достигает значения $i_{e_{нас}}$ в точке D , где $U=0$. Таким образом, график зависимости

$\ln i_e$ от напряжения на зонде на участке характеристики BD должен быть прямой линией с наклоном e/kT_e (рис.4). Значение $i_{e_{нас}}$ легко найти по ВАХ зонда, прибавляя к полному току зонда полный ионный ток $i_{+нас}$. Для температуры электронов получаем:

$$T_e = e/(k \cdot \text{tg}\varphi).$$

Число электронов, попадающих на 1 см^2 поверхности зонда за одну секунду $N = n_e v_e / 4$, где v_e – средняя арифметическая скорость максвелловского распределения: $v_e = \sqrt{8kT_e / \pi m}$. Один из множителей $1/2$ в $1/4$ появляется из-за того, что тока половина частиц летит в нужную сторону, другой – в результате усреднения по направлениям скоростей v_e к нормали поверхности. При совпадении тока зонда с электронным током насыщения при $U=0$ (в точке перегиба характеристики $\ln i_e(U)$) $i_3 = i_{e_{нас}} = j_{e_{хаот}} S$. Хаотичный ток электронов на границе слоя объемного заряда равен $j_{e_{хаот}} = eN$, и, зная величину электронной температуры в данном случае, можно найти плотность электронов

$$n_e = i_{e_{нас}} \left(Se \sqrt{kT_e / 2\pi m} \right)^{-1}.$$

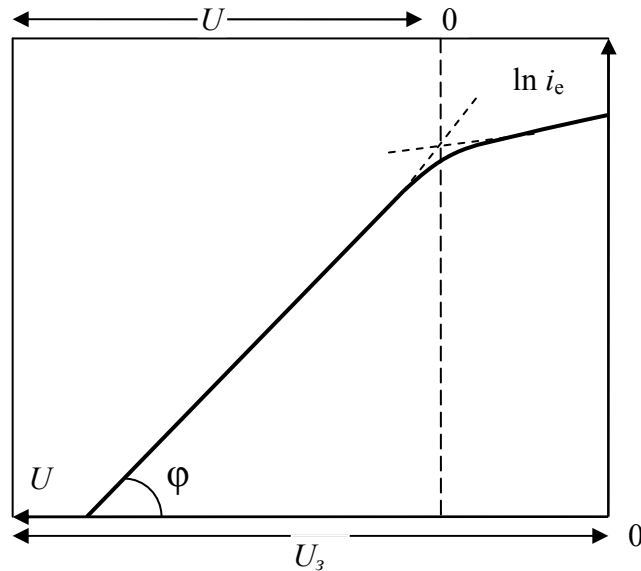


Рис.4. Полулогарифмическая характеристика зондового тока

По логарифмическому графику определяется также потенциал плазмы. Поскольку для точки перегиба зондовой характеристики $U=0$, то получаем $U_3 = U_{\Pi}$. Тем самым можно определить потенциал точки плазмы, в которую введен зонд.

В работе для диагностики плазмы применяется также зонд цилиндрической формы. Теория зондов другой геометрии аналогична теории плоского зонда, но имеет некоторое усложнение. Если зонд мал, площадь внешней поверхности слоя объемного заряда гораздо больше площади самого зонда. Поэтому когда частица входит в слой со сравнительно высокой энергией, а ее траектория не проходит вблизи зонда, она не по-

падет на зонд, если он притягивает ее не слишком сильно. Поэтому ток зонда зависит от напряжения даже в тех областях, где плоский зонд принимает токи насыщения. Этот же механизм приводит к тому, что излом зависимости $\ln i_e(U)$ не всегда бывает достаточно резким для точного определения потенциала плазмы. В таких случаях за соответствующую точку принимают место пересечения продолжений прямолинейных участков (см. рис. 4)

Таким образом, метод зондовых характеристик дает возможность:

1. Проверить по виду логарифмического графика, существует ли в исследуемой плазме максвелловское распределение скоростей электронов (линейный ход начального участка зависимости);
2. Найти значение потенциала плазмы в месте расположения зонда;
3. Определить температуру электронного газа в плазме T_e ;
4. Найти плотность хаотического тока электронов $i_{e_{нас}}$;
5. Определить концентрацию электронов в плазме n_e .

Зондовый метод позволяет определить локальные параметры плазмы со следующей точностью: электронную температуру T_e : 10–20 %; концентрацию электронов в плазме при использовании плоского зонда n_e : 20–30%; потенциал плазмы U_n : 5–10%.

УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1. Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с описанием лабораторной работы и рекомендованной литературой по данному вопросу.

2. Ознакомиться со схемой эксперимента. Объяснить назначение элементов схемы и методику измерения зондовой ВАХ. Исследование ВАХ зонда следует проводить при изменении потенциала зонда от –100 до 0 В, внимательно отслеживая точки перегиба зависимости. Особое внимание необходимо обратить на точку изменения полярности зондового тока, для чего рекомендуется включить в электрическую цепь зонда микроамперметр со средней точкой отсчета.

3. Построить ВАХ зонда для полного тока.

4. Рассчитать и построить график зависимости логарифма тока электронов на зонд от напряжения относительно анода.

5. Определить параметры плазмы.

При измерении ВАХ непосредственно измеряется полный ток на зонд, а не плотность тока, требуемая для расчетов. Поэтому необходимо знать площадь свобод-

ной поверхности зонда, соприкасающейся с плазмой. Геометрические размеры зонда следующие: диаметр цилиндрического зонда – 0,4 мм, длина цилиндрического зонда – 3 мм, диаметр плоского зонда – 3,5 мм.

6. Объяснить полученные результаты и дать краткие выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего предназначен зондовый метод?
2. Назовите основные свойства газоразрядной плазмы.
3. Что представляет собой холодный зонд?
4. Объяснить методику диагностики с помощью холодного зонда?
5. Привести качественную интерпретацию вида зондовой ВАХ.
6. Что такое плавающий потенциал?
7. В чем состоит методика обработки зондовой ВАХ?
8. Чем объясняется линейный участок полулогарифмической характеристики?
9. Как определить потенциал плазмы?
10. Как находится электронная температура?