

РАБОТА 2.09

Газоразрядная плазма

Цель работы

1. Снять вольт-амперную характеристику электрического зонда Лэнгмюра, помещенного в газоразрядную плазму.
2. По данным п.1 найти следующие параметры плазмы: потенциал невозмущенной плазмы в окрестности зонда, температуру и концентрацию электронов, степень ионизации.

Введение

Газ, в котором значительная часть атомов или молекул ионизована, а суммарный заряд ионов и электронов практически равен нулю, называют плазмой. В физических лабораториях и технических устройствах плазму получают обычно с помощью электрического разряда в газах (газоразрядная плазма).

В стационарном состоянии в плазме непрерывно идут два взаимно уравновешивающих друг друга процесса: ионизация нейтральных атомов и рекомбинация заряженных частиц с образованием нейтральных атомов. В газоразрядной плазме ионизация происходит при неупругом столкновении электронов, ускоренных электрическим полем, с нейтральными атомами (ударная ионизация). Газоразрядная плазма обычно слабо ионизована (степень ионизации, т.е. доля ионов в смеси атомов ионов, как правило, менее 1%).

Из-за большой разницы в массах электрона и иона для плазмы возможны такие квазиравновесные состояния, которые характеризуются двумя температурами. В самом деле, пусть равновесное состояние плазмы было нарушено кратковременным внешним воздействием. В предоставленной самой себе плазме в результате столкновений частиц (главным образом, упругих) через некоторое время должно установиться равновесное (максвелловское) распределение частиц по кинетическим энергиям. Известно, что энергия, которая передается от частицы к частице при упругих столкновениях, зависит от соотношения масс сталкивающихся частиц и максимальна при их равенстве. Таким образом, энергообмен в плазме идет преимущественно при столкновениях электронов друг с другом и ионов друг с другом, но не электронов с ионами. В результате устанавливается как бы свое максвелловское распределение электронов по энергиям и свое (т

максвелловское) распределение ионов. Каждое из них характеризуется своим значением средней кинетической энергии $\frac{3}{2}kT$ т.е. своим значением температуры: T_e —электронной и T_i -ионной.

Если плазма находится в электрическом поле (как при газовом разряде), то энергию от поля получают в основном электроны (из-за большой подвижности). Поэтому электронная температура в такой плазме оказывается выше ионной: различие между ними может быть весьма значительным. Так, в газоразрядной трубке температура $T_e \approx 10^4$ K, а $T_i \approx 10^2$ K. Из сказанного следует, что электронная температура является важным параметром плазмы.

Другим важным параметром плазмы является концентрация в ней электронов n_e (и, следовательно, ионов, ибо $n_i = n_e$), так как n_e в первую очередь определяет электропроводность плазмы.

В отсутствие внешнего магнитного поля оба эти параметра плазмы (T_e и n_e) могут быть измерены одновременно методом электрического зонда Ленгмюра. Зондом называют металлический электрод небольших размеров, помещенный в плазму. Обычно он присоединен через источник напряжения к опорному электроду, который одновременно является катодом или анодом разрядного промежутка (рис. 9.1).

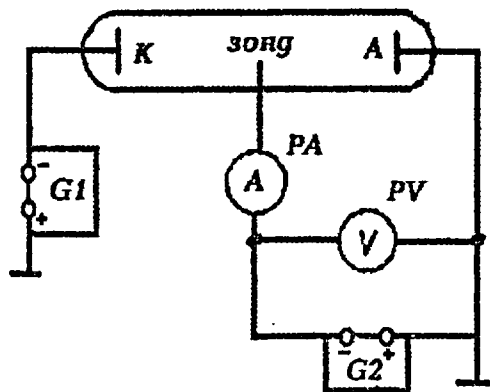


Рис 9 1 Схема подключения электрического зонда

Зонд, находящийся в соприкосновении с ионизованным газом, из-за попадания на его поверхность заряженных частиц принимает потенциал, отличающийся от потенциала плазмы в данной точке. Поэтому мы не можем измерить потенциал плазмы, просто присоединяя к зонду электростатический вольтметр. Лэнгмюр предложил снимать вольт-амперную характеристику (ВАХ) зонда и показал, что соответствующей обработкой этой характеристики можно найти не только локальный потенциал невозмущенной плазмы φ_0 , но также концентрации и температуры заряженных частиц.

Теория Лэнгмюра построена на следующих основных упрощающих предположениях

а) плазма не ограничена, однородна и в отсутствие зонда квазинейтральна ($n_i = n_e$);

б) электроны и ионы имеют максвелловское распределение по скоростям, характеризующиеся соответственно температурами T_e и T_i , причем $T_e \gg T_i$;

в) каждая частица, столкнувшаяся с поверхностью зонда, поглощается им (отсутствует отражение частиц);

г) область, непосредственно прилегающая к поверхности зонда (в ней параметры плазмы отличаются от параметров невозмущенной плазмы), ограничена слоем избыточного пространственного заряда, толщина которого мала по сравнению с размерами зонда;

д) внутри пространственного заряда частицы движутся без столкновений.

На рис. 9.1 амперметр показывает значение суммарного тока на зонд $I_z = I_e - I_i$ (I_e -электронный ток, I_i -ток ионов), вольтметр - потенциал зонда φ_z относительно опорного электрода (анода). Общий вид ВАХ зонда представлен на рис. 9.2а. Потенциал невозмущенной плазмы в месте установки зонда обозначим через φ_0 . Разность $\varphi = \varphi_z - \varphi_0$, очевидно, определяет потенциал зонда относительно плазмы в месте его измерения.

При больших отрицательных потенциалах зонда относительно анода (и относительно невозмущенной плазмы) поток электронов из плазмы на зонд практически заперт задерживающим потенциалом $\varphi < 0$ (потенциальным барьером для электронов). На зонд идут только положительные ионы, которые образуют вокруг зонда область пространственного положительного заряда. На рис. 9.2а большому отрицательному потенциалу зонда соответствует левая часть ВАХ, представляющая собой практически прямую линию с небольшим

наклоном (участок АВ). Ток, создаваемый положительными ионами, невелик, так как при равной концентрации с электронами ионы обладают во много раз меньшей подвижностью.

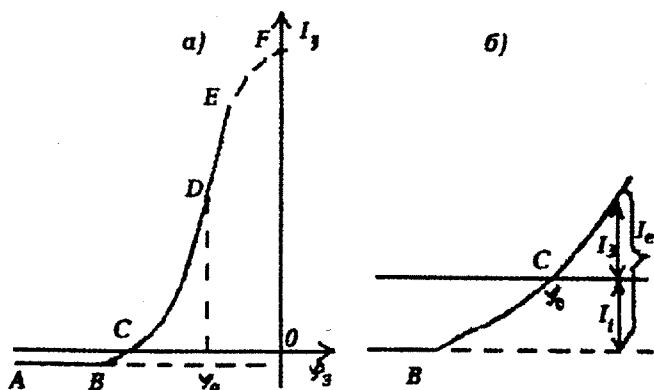


Рис. 9.2. Вольт-амперная характеристика зонда

По мере уменьшения (по модулю) отрицательного потенциала зонда на него начинают попадать в заметном количестве и электроны. Точка С на ВАХ соответствует нулевому полному току, т.е. условию $I_e = I_i$. На рис. 9.2б участок ВАХ вблизи точки С изображен для наглядности в увеличенном масштабе. Дальнейшее уменьшение потенциала зонда (при еще отрицательном ϕ) приводит к снижению потенциального барьера для электронов плазмы, и электронный ток на зонд возрастет (участок СД на рис. 9.2а).

При положительном потенциале зонда по отношению к плазме электроны будут ускоряться по направлению к зонду (участок ДЕ). Около зонда образуется слой отрицательного пространственного заряда, точно так же защищающий невозмущенную плазму от действия положительного заряда зонда, как раньше слой положительного заряда защищал ту же плазму от отрицательного заряда зонда. На зонд будут приходить все электроны, попадающие на внешнюю границу слоя (режим тока насыщения, участок ЕF на ВАХ). Дальнейшее увеличение потенциала зонда не должно было бы влиять на зондовый ток, на самом деле он несколько возрастает из-за расширения границ области отрицательного объемного заряда.

Дополним качественное рассмотрение зондой характеристики количественным анализом. Если потенциал зонда равен потенциалу окружающей плазмы ($\varphi_3 = \varphi_0$ или $\varphi = 0$, точка Д на ВАХ), и электроны обладают максвелловским распределением по скоростям, то согласно кинетической теории газов (см., например, [5], 7) на поверхность зонда площадью S будут попадать $\left(n_e v_e S / 4\right)$ электронов в секунду. Следовательно, электронный ток на зонд в этом случае равен:

$$I_{e0} = \frac{en_e v_e S}{4}, \quad (9.1)$$

где $v_e = \left(8kT_e / \pi m_e\right)^{1/2}$ - средняя тепловая скорость электронов.

Формула (9.1) определяет ток на зонд при условии $\varphi_3 = \varphi_0$, т.е. в отсутствие потенциального барьера для электронов. При выполнении условия $\varphi < 0$ (т.е. для области слева от точки Д на ВАХ) в призондовом слое объемного заряда образуется потенциальный барьер для электронов высотой $e\varphi$. При максвелловском распределении электронов невозмущенной плазмы по скоростям их концентрация за барьером, т.е. в непосредственной близости от поверхности зонда, согласно распределению Больцмана равна:

$$n_{eS} = n_e \exp\left(\frac{e\varphi}{kT}\right), \quad \varphi < 0$$

а электронный ток на зонд в этом случае равен:

$$I_e = \frac{en_{eS} v_e S}{4} = \frac{en_e v_e S}{4} \exp\left(\frac{e\varphi}{kT}\right)$$

или с учетом (9.1):

$$I_e = I_{e0} \exp\left(\frac{e\varphi}{kT}\right). \quad (9.2)$$

Еще раз отметим, что в эксперименте измеряется полный ток на зонд $I_3 = I_e - I_i$ (согласно этому определению, I_e и I_i рассматриваются как положительные величины, а полный ток может менять знак). Поэтому для нахождения электронного тока I_e необходимо учитывать I_i , как показано на рис. 9.26. Для нахождения ионного тока правее точки В можно воспользоваться экстраполяцией (продолжением) линейного графика $I_i(\varphi_3)$ в эту область.

Логарифмируя (9.2), получим:

$$\ln I_e = \text{const} + \frac{e}{kT_e} \varphi, \quad (9.3)$$

где $\text{const} = \ln I_{e0} - \frac{e\varphi_0}{kT_e}$.

Угловым коэффициентом прямой (9.3) равен:

$$\gamma = \frac{\Delta(\ln I_e)}{\Delta\varphi_3} = \frac{e}{kT_e}. \quad (9.4)$$

Если найти его из экспериментальной зависимости $\ln I_e = f(\varphi_3)$, то из (9.4) можно вычислить электронную температуру плазмы.

Когда потенциал зонда достигает значения потенциала невозмущенной плазмы в окрестности зонда, закон возрастания тока с увеличением потенциала резко изменяется: ток будет увеличиваться значительно медленнее. Поэтому кривая зависимости $\ln I_e = f(\varphi_3)$ в окрестности точки $\varphi_3 = \varphi_0$, должна иметь резкий излом (рис.9.3). Для отыскания значения φ_0 рекомендуется продолжить линейные участки 1 и 2 экспериментальной кривой до их пересечения, как показано на рис. 9.3. Точке пересечения соответствуют значения $\varphi_3 = \varphi_0$ и $I_e = I_{e0}$. Наконец, используя найденные значения T_e и I_{e0} , можно рассчитать по формуле (9.1) концентрацию электронов в невозмущенной плазме.

Экспериментальная установка

В работе исследуются параметры плазмы положительного столба самостоятельного тлеющего разряда. Схема установки приведена на рис. 9.4. Разрядная трубка заполнена аргоном (давление газа в трубке указано на установке). Анод трубки заземлен. Отрицательное напряжение на катод подают через ограничительный резистор R1 от источника питания G1 (выход "0-600 В" универсального источника питания УИП-1). Напряжение питания трубки U_k и ток разряда I_p измеряют соответственно вольтметром или амперметром на передней панели УИП-1. Там же находятся ручки регулирования выходного напряжения (см. [1]).

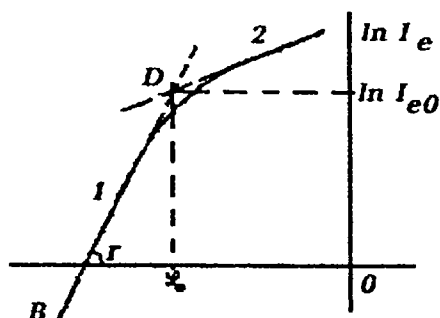


Рис. 9.3 График зависимости $\ln I_e = f(\varphi_3)$.

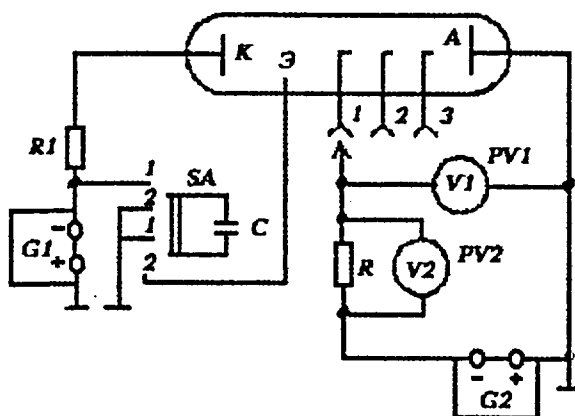


Рис. 9.4 Схема экспериментальной установки

Для зажигания разряда используют цепь с переключателем SA и конденсатором C. При переключении тумблера SA в положение 2 между катодом K и вспомогательным электродом Э подается удвоенное напряжение $2U_k$, что облегчает зажигание разряда. Рекомендуемые рабочие режимы разрядной трубки указаны на установке.

В разрядную трубку впаяны три цилиндрических зонда на равных расстояниях друг от друга (расстояние между зондами и площади их поверхности указаны на установке). Любой из зондов может быть подключен к измерительной цепи с помощью соединительного провода со штекером.

Напряжение между зондом и анодом φ_3 , подают от источника питания (выход “0-400 В” УИП-1), регулируют ручками “Грубо” и “Главно” на передней панели УИП-1, измеряют цифровым вольтметром PV1. Ток на зонд вычисляют по показаниям цифрового вольтметра PV2, которым измеряют напряжение на резисторе R с известным сопротивлением (100 Ом).

Проведение эксперимента

1. Ознакомьтесь с правилами техники безопасности. Выполните указанные в них рекомендации.

В работе используется мощный высоковольтный источник питания УИП-1 (600 В, 0,6 А). Будьте особенно внимательны в обращении с ним. **ЗАПРЕЩАЕТСЯ** производить самовольные изменения в схеме питания разряда.

2. Подготовка установки к работе:

а) включите питание цифровых вольтметров, дайте прогреться, установите на вольтметре PV1 предел измерения “100 В”, а на вольтметре PV2 -предел “1 В”;

б) выведите в “нули” ручки регулировки выхода на УИП-1;

с) отсоедините зонды от измерительной цепи (вынув из гнезда штекер соединительного провода); в противном случае зажигание разряда может привести к гибели зонда и выходу из строя УИП-1;

д) включите тумблер “Сеть” на УИП-1.

3. Зажигание разряда и выбор рабочего режима трубки:

а) установите напряжение питания трубки $U_k = 600$ В;

б) переключив тумблер “Поджог” вверх (положение 2 на рис. 9.4), зажгите разряд;

с) уменьшите напряжение U_k до (400-500) В, установив некоторое значение разрядного тока $I_p \leq 100$ мА; выбранное значение I_p , следует контролировать и поддерживать в ходе эксперимента.

4. Снятие ВАХ зонда.

Подключите нужный зонд к измерительной цепи (номер зонда указывает преподаватель). При измерениях и обработке результатов учитывайте, что в зависимости от конструктивных особенностей конкретной установки участок EF ВАХ (см. рис. 9.2а) может оказаться весьма малым. Поэтому необходимо

производить измерения вплоть до наименьшего (по модулю) значения φ_3 , которое удастся установить.

Рекомендуется сначала измерить координаты точек А, С и F на ВАХ, показать их преподавателю и совместно выбрать шаги измерения φ_3 при последующих измерениях. Обычно бывает целесообразно проводить измерения: в окрестности точки С (т.е. при $\varphi_3 = (\varphi_e \pm 3)$ В) - через каждые (0,3-0,5) В, далее справа от С вплоть до F - через 1 В, слева от С вплоть до А - через (3-5) В. Изменяя напряжение зонда по указанной схеме, измеряйте совместно напряжение φ_3 и ток на зонд I_3 (убедитесь в том, что показания вольтметра PV2 при выбранных пределах измерения и сопротивлении резистора R дают значения тока в микроамперах - без учета высвечиваемой на табло вольтметра запятой). Учтите, что полный ток I_3 является положительным при условии $I_e > I_i$, т.е. справа от точки С (независимо от знака, высвечиваемого на табло вольтметра PV2). Результаты измерений вписывайте в табл. 9.1.

Таблица 9.1 Вольт-амперная характеристика зонда №.....

№ опыта	φ_3 , В	I_3 , мкА	I_i , мкА	I_e , мкА	$\ln I_e$

Обработка результатов

1. Постройте график 1 - вольт-амперную характеристику зонда в линейном масштабе. Учитывая, что $I_i \ll I_e$ целесообразно, в отличие от рис. 9.2а, выбрать разные масштабы по оси ординат для положительных (участок CDEF) и отрицательных (участок ABC) токов на зонд. Увеличение масштаба (т.е. уменьшение цены деления в мкА/мм) в 10-100 раз при построении участка ABC повышает точность последующей графической обработки ВАХ. Проведите штриховую линию - экстраполяцию линейного участка АВ вправо от точки В. По этой экстраполяции найдите значения ионного тока I_i , соответствующие экспериментальным точкам справа от В, и впишите их в таблицы 9.1. Затем вычислите и впишите в следующий столбец таблицы соответствующие значения электронного тока I_e , а также значения $\ln I_e$.

2: Постройте вспомогательный график 2 - зависимость $\ln I_e = f(\varphi_3)$ для области ВАХ правее точки В. Выделите на графике линейные участки 1 и 2

(см. рис. 9.3), продолжите их до пересечения и найдите из графика значения потенциала невозмущенной плазмы φ_0 и соответствующего ему тока I_{e0} .

3. По экспериментальным точкам, образующим участок 1 на вспомогательном графике, найдите угловой коэффициент зависимости $\ln I_e = f(\varphi_0)$ одним из методов [2]: по методу наименьших квадратов (если есть подходящий компьютер) или по методу парных точек, а также погрешность углового коэффициента. Затем, используя формулу (9.4), вычислите электронную температуру T_e и ее погрешность.

4. С помощью формулы (9.1) вычислите концентрацию электронов и степень ионизации газа $\beta = \frac{n_e}{n}$; концентрацию атомов газа легко вычислить по известному давлению p в трубке: $n = \frac{p}{kT}$, где T - комнатная температура. Вследствие большой неопределенности значения тока насыщения I_{e0} измерение концентрации электронов данным методом носит оценочный характер и поэтому можно не вычислять погрешности для n_e и β .

Контрольные вопросы

1. Опишите физические явления, происходящие вблизи помещенного в плазму зонда при подаче на него потенциала, отличающегося от потенциала невозмущенной плазмы (в большую или меньшую сторону). Как это сказывается в виде ВАХ зонда?

2. Какие основные допущения лежат в основе зонда Ленгмюра? Справедливы ли они, на ваш взгляд в условиях нашего эксперимента?

3. Почему рекомендуется делать измерения наиболее часто в окрестности точки С на ВАХ, т.е. при сравнительно малых электронных токах?

4. Что такое электронная температура и как она измеряется в опыте?

5. Почему при вычислении концентрации нейтральных атомов в плазме по уравнению идеального состояния газа ($P = nkT$) используется значение комнатной температуры?

6. Перечислите все меры предосторожности, которые следует предпринять, чтобы не вывести установку из строя. Каковы главные в данном случае правила техники безопасности?